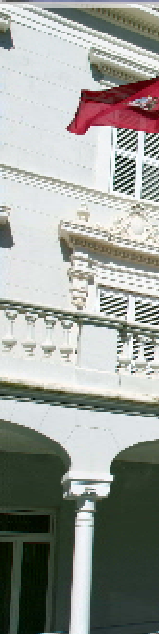
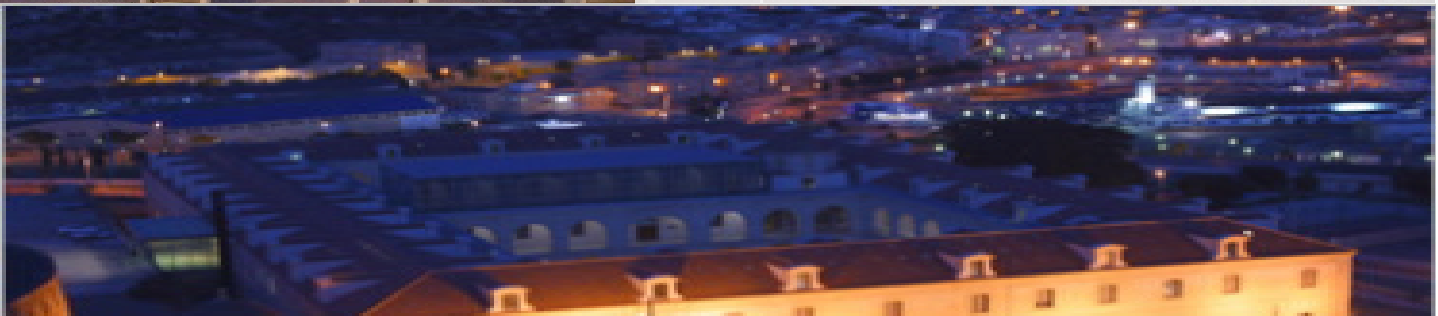


II Jornadas de Introducción a la Investigación de la UPCT



Mayo 2009



ETSIA, ETSIT, ETSII



Director de la Revista

Gaspar Pedreño López

Coordinadores Jornadas

María Manchado Rojo

Pedro Antonio Robles Sánchez

Comité Organizador Jornadas

Sergio Almagro Carrión

Ramón Aparicio Pardo

María Victoria Bueno Delgado

María Caballero Romero

Belén Gallego Elvira

Miguel Ángel García Fernández

Pedro José García Laencina

Concepción García Pardo

Gaspar Pedreño López

Mario Rosique Blasco

M^a Francisca Rosique Contreras

Alejandro Tomás Callejas

Imprime

Editorial Aglaya

C/ Zagreb, parc. 14-15

30353 Cartagena

www.editorialaglaya.com

ISSN 1888-8356

Depósito Legal: Mu-1618-2008

Impreso en España

Printed in Spain

Mayo 2009

- 2 Editorial
- 3 Saluda ETSIA
- 4 Saluda ETSIT
- 5 Saluda ETSII

Investigación ETSIA

- 7 Efectos de las coberturas de sombreado sobre la calidad del agua almacenada en balsas de regulación de riego
- 10 Eficiencia de las coberturas de sombreado para reducción de las pérdidas por evaporación en embalses de riego bajo condiciones de clima semiárido
- 13 Utilidad de la medida de flujo de savia como indicador de la tasa de transpiración en plantas de pepino
- 16 Modelización hidrológica e hidráulica y sistemas de captación en cauces efímeros
- 21 Evaluación de las acciones hidrodinámicas a pie de presa por efecto del desbordamiento por coronación
- 26 Efecto de tratamientos isotérmicos sobre la supervivencia de *Listeria monocytogenes* evaluada in vitro
- 29 Cuantificación de parámetros cinéticos de polímeros conductores: poli-3, 4-etilendioxitiofeno (PEDOT)
- 32 Modelado de Ecosistemas
- 35 Comparación de dos métodos de estimación de la transpiración en almendro
- 38 Producción de energía y depuración simultánea de aguas mediante Pilas de Combustible Microbianas. Aplicación a las aguas del sureste español

Investigación ETSIT

- 42 Evaluación precisa de iris en cavidades resonantes en guía de onda y aplicación a la caracterización dieléctrica de materiales
- 45 Producción de Hidrógeno a partir de Energía Solar Fotovoltaica
- 50 Diseño Óptimo de Comités de Redes Neuronales Artificiales
- 54 Modelado Matemático del Control de Flujo en HSDPA
- 57 Respuesta termorregulatoria de usuario en la banda de GSM 1800
- 62 Un Lenguaje específico de dominio para el desarrollo de aplicaciones domóticas
- 65 Utilización de códigos Fountain para la transmisión fiable de datos en redes Homeplug AV
- 68 Planificación de Redes Troncales de Conmutación Óptica Transparente
- 72 Sistema de Medidas de Banda Ancha en el Dominio del Tiempo y Comparación con Sistema en el Dominio de la Frecuencia
- 76 Ajuste de los modelos físicos 802.16 para alta movilidad

Investigación ETSII

- 79 Plataforma Robótica Antropomorfa SAMANTA
- 83 Revisión de los algoritmos anti-isla: Problemática asociada a la Generación Distribuida
- 89 Síntesis de nanopartículas seudo esféricas monodispersas de magnetita con diámetro modal inferior a 50 nm
- 92 Análisis cualitativo del flujo fásico de un sistema Manev en un sistema de referencia rotante
- 95 El problema de Kepler en un sistema de referencia rotante. Estudio topológico del espacio fásico
- 98 Temas de interés para los miembros del proyecto: *Sobre algunos métodos numéricos y su relación con modelos matemáticos*

Editorial



Tras el gran éxito cosechado en la primera edición, un año más se celebran las Jornadas de Introducción a la Investigación de la UPCT. Como miembro de la junta directiva de la Asociación de Jóvenes Investigadores de Cartagena (AJICT) os doy la bienvenida en nombre de todas las personas que a ella pertenecemos.

El año pasado, cuando iniciamos esta andadura, ninguno de nosotros éramos conscientes del esfuerzo y dedicación que nos iba a suponer. Todos los que estuvimos en aquel primer comité organizador sabemos ahora lo que nos costó prepararlo todo, pero no cabe duda que dicho esfuerzo mereció la pena y, es por ello, que repetimos de nuevo este año.

En la primera edición todas nuestras expectativas se vieron superadas con creces. En primer lugar, por el gran apoyo tanto económico como humano que nos brindaron Universidad y Escuelas (ETSIT, ETSIA) sin el cual hubiera sido imposible concebir estas jornadas y, en segundo lugar, por el alto grado de participación con el que contamos por parte de los distintos grupos de investigación. También es reseñable la elevada asistencia a las jornadas (superior a doscientas personas) que desbordó todas nuestras previsiones, dejando pequeño el salón de grados y obligándonos a habilitar una segunda sala para las ponencias.

Este año como novedad, cabe destacar la participación de la escuela de industriales (ETSII) que se une a las dos escuelas que apoyaron este proyecto desde el principio, telecomunicaciones (ETSIT) y agrónomos (ETSIA). De este modo, en estas jornadas contaremos con ponencias a cargo de grupos de investigación de las tres escuelas que se complementarán con diversas conferencias y mesas de debate sobre cuestiones directamente relacionadas con el mundo de la investigación.

En lo que a la revista respecta, este año también se ha ganado en calidad y cantidad. El número de trabajos publicados prácticamente se ha duplicado, consiguiendo ofrecer una amplia visión de la actividad investigadora llevada a cabo en nuestra universidad. Muchos de estos artículos se verán complementados con una exposición oral realizada por sus respectivos autores durante la celebración de las jornadas.

El objetivo de todas estas actividades, novedades e iniciativas no es otro que crear interés por la investigación entre alumnos, empresas y la sociedad en general, convirtiéndonos de este modo en un evento útil para la universidad.

Por último, quisiera dar las gracias a todos los que habéis hecho posible de nuevo la realización de estas jornadas. Esperemos que el próximo año nos volvamos a ver.

Gaspar Pedreño López
Director de la Revista

Saluda ETSIA

Como Profesor de nuestra Universidad y Director de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica (ETSIA) me es especialmente grato daros la bienvenida a estas II Jornadas de Introducción a la Investigación de la UPCT.

La ETSIA es el centro de la UPCT con mayor actividad investigadora, con grupos de I+D consolidados con gran prestigio nacional e internacional. La ETSIA, un centro pequeño, ha generado el 37,3% de la producción científica de la UPCT en el período 1999-2005, siendo el centro con mayor actividad científica (Fundación Séneca, 2007). Además, si se considerara este valor en términos relativos por profesor estamos en rangos muy altos. Considerando sólo los Proyectos de I+D del Plan Nacional, la ETSIA ha conseguido el 47% de la financiación en proyectos de investigación de toda la UPCT (MEC, 2008).

Como se deduce de estos datos, la ETSIA además de ser un centro con una gran dedicación docente, como se desprende de la alta valoración que dan los alumnos en las encuestas de calidad docente, es un centro con una gran vocación investigadora. De hecho entiendo que la Universidad debe impartir conocimiento que es capaz de producir, por su doble función indisoluble de transmisora y generadora de conocimiento. Por tanto la calidad docente es consecuencia de la calidad científica.

No es casualidad que el embrión de las Jornadas que aquí se presentan haya sido unas I Jornadas de Introducción a la Investigación de la ETSIA, que se celebraron hace dos años en nuestra Escuela. La valiosísima iniciativa de un grupo de becarios y contratados de investigación de crear la Asociación de Jóvenes Investigadores de Cartagena (AJICT) ha sido apoyada con entusiasmo desde un principio por la Dirección de la ETSIA. Por ello, consideramos un gran acierto ceder la organización de estas Jornadas, que probablemente harán mucho mejor, además de extenderse a todo el ámbito de investigación de la UPCT.

Estas Jornadas suponen una notable oportunidad para que los alumnos (y también los profesores) conozcan las actividades de investigación que desarrollan los Grupos de I+D de nuestra Universidad. Además es un buen foro para conocer en qué consiste la investigación y poder descubrir la vocación científica. Es una labor no exenta de esfuerzo y mucho trabajo, pero enormemente gratificadora, siendo como es la vía de descubrir y conocer mejor este universo maravilloso que nos ha dado Dios, para el bien y el progreso de toda la humanidad.

Por último mi sincero reconocimiento a los integrantes de la AJICT por su esmerada labor de organización de estas II Jornadas de Introducción a la Investigación de la UPCT. Mi enhorabuena.

Recibid todos los participantes un afectuoso saludo.



Pablo Bielza Lino
Director de la ETSIA

Saluda ETSIT



El investigador pasa por momentos de soledad, pero también por otros en los que pone en común con otros investigadores sus resultados. Bienvenidos todos a las II Jornadas de Introducción a la Investigación de la Universidad Politécnica de Cartagena (UPCT) organizadas por la Asociación de Jóvenes Investigadores de Cartagena (AJICT).

Una de las fortalezas de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Telecomunicación (ETSIT) es, precisamente, el elevado número de investigadores entre nuestro profesorado, lo que repercute positivamente en la formación de nuestros alumnos. Todos estos profesores forman parte de diferentes Grupos de investigación, en el seno de los cuales, los alumnos tienen la posibilidad de iniciarse en la investigación realizando su tesis doctoral.

También me gustaría destacar que en la ETSIT ha sido siempre una prioridad que los alumnos pudiesen realizar sus estudios de doctorado en la propia Escuela. En este sentido, actualmente es posible cursar el Master investigador en Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, que posee la Mención de Calidad del Ministerio, y que permite alcanzar, junto con la realización de la tesis doctoral, el grado de Doctor en Ingeniería de Telecomunicación.

Me gustaría, en esta ocasión, agradecer especialmente a los alumnos y profesores de la ETSIT, que han decidido participar con sus investigaciones en estas Jornadas, y a los organizadores por hacer posible que la actividad investigadora de los Grupos de Investigación en el ámbito de las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones tenga una oportunidad más de ser compartida.

Un saludo afectuoso,
Leandro Juan Llácer
Director de la ETSIT

Desde la Dirección de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de la Universidad Politécnica de Cartagena queremos felicitar a la Asociación de Jóvenes Investigadores de Cartagena por esta iniciativa que, por segundo año, pretende dar a conocer de primera mano “qué y cómo se investiga en la UPCT”. En un momento en que parece que las noticias del mundo universitario fluyen exclusivamente en torno al proceso de Bolonia y el diseño de los nuevos planes de estudio de grado, debemos hacer hincapié en dos aspectos relacionados con esta Jornada.

En primer lugar debemos recordar la regulación que se ha realizado de los estudios de posgrado (máster y/o doctorado) a través del R.D. 1393/2007. Dicha normativa ha generado una considerable incertidumbre a la hora de diseñar estos programas formativos en las universidades españolas, puesto que ha sido necesario acoplar esta “nueva estructura” a los planes de estudio de ingeniería técnica (ciclo corto) e ingeniería (ciclo largo), pensando además en que sirvan como continuación de los futuros planes de estudio de grado. Un auténtico galimatías que generará situaciones anómalas hasta que finalice la transición hacia el nuevo modelo (grado + master + doctorado). Lo razonable hubiera sido permitir sólo los nuevos programas de posgrado acoplados a los nuevos planes de estudio de grado, pero a esto ya llegamos tarde. Además hubiera servido para que las universidades realizaran un análisis sosegado de la adecuación de estos estudios, mejoraran su calidad y optimizaran los recursos disponibles, de manera que se garantizase una financiación adecuada de los mismos.

En segundo lugar es necesario recordar que los excelentes índices de empleabilidad de los recién titulados en Ingeniería hace que sea difícil contar con jóvenes ingenieros e ingenieras con vocación investigadora, especialmente cuando esta formación a menudo no se ve reconocida por las empresas. Ahora que se habla frecuentemente de que hay que abordar esta complicada situación económica mediante una mejora de la productividad a través de la innovación y la transferencia de tecnología (investigación aplicada), cobra más sentido reivindicar la participación de jóvenes ingenieros e investigadores en este proceso. Las empresas deberían apostar por la universidad como foco de investigación y fuente de ideas que ofrezcan oportunidades de negocio viables y, a la vez, la universidad tiene que flexibilizar sus estructuras para poder responder de una forma más ágil a los requerimientos de los diversos sectores económicos. Esta confianza mutua sigue siendo una tarea pendiente pero que consolidaría la misión global de la universidad como motor de la sociedad.

Creemos que los inconvenientes señalados anteriormente justifican más que nunca la existencia de una jornada como ésta, en la que se dará a conocer la situación de nuestros jóvenes investigadores, se informará de las iniciativas en materia de investigación en la UPCT y se trasladará a las empresas la invitación para que se dirijan a nuestra joven universidad para plantear líneas de colaboración eficaces. Enhorabuena a todos los que habéis contribuido a esta iniciativa.



Luis Javier Lozano Blanco
Director ETSII

Efectos de las coberturas de sombreo sobre la calidad del agua almacenada en balsas de regulación de riego.

Maestre Valero, J.F., Gallego Elvira, B., Martínez Álvarez, V.

Universidad Politécnica de Cartagena, Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica

Dpto. de Ing. de los Alimentos y del Equipamiento. Agrícola, Área Agroforestal

Paseo Alfonso XIII, 48, 30203 Cartagena (Murcia)

Teléfono: 968 32 7052, Fax: 968 32 7031

E-mail: Josef.maestre@upct.es

Resumen: El objetivo de este estudio fue identificar el efecto de la instalación de una cobertura de sombreo suspendida (CSS) en la calidad del agua almacenada en balsas de riego. Durante un año se monitorizaron tres balsas de riego ubicadas en el sureste español. Una de ellas, B1, se cubrió con una CSS mientras que las otras dos, B2 y B3, permanecieron descubiertas durante toda la experimentación. Mensualmente se recogieron muestras de agua a varias profundidades y se utilizó una sonda multiparamétrica YSI – Series para determinar los principales parámetros que afectan a la calidad del agua (algas, temperatura, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto, clorofila y turbidez). Los resultados muestran una mejora de la calidad del agua almacenada para su uso en sistemas de riego localizado y de alta presión que requieren bajos niveles de concentración de algas.

1 Introducción. Objetivos

En las zonas del sureste español, caracterizadas por un clima semiárido, el continuo crecimiento del regadío en las últimas décadas tras la construcción del trasvase Tajo – Segura, el desarrollo industrial, el aumento de la población etc. han promovido el aumento de la competencia por los recursos hídricos en la zona. Actualmente existe un déficit de agua en la Cuenca del Segura (CS) de 460 hm³ que afecta a 2,7·10⁵ ha de las tierras regadas [2].

En estas zonas, además de la escasez de agua, existe una falta de adaptación de los sistemas de distribución de agua, generalmente organizados mediante turnos, a las modernas técnicas de alta frecuencia y riego localizado que requieren un suministro a la demanda. Como consecuencia, los agricultores, comunidades de regantes y agencias del agua construyen balsas de riego para almacenar el agua. Estas balsas son reservorios potenciales de nutrientes y favorecen el crecimiento y desarrollo de algas provocando un serio problema en la calidad del agua y en los sistemas de filtrado y de riego localizado [5].

Otro problema asociado es la notable pérdida de agua por evaporación que estas balsas experimentan. Martínez Álvarez et al. (2008) estimaron unas pérdidas de 60 hm³ desde las cerca de 15.000 balsas de riego ubicadas en la CS. Son varias las técnicas dirigidas a reducir las pérdidas de agua por evaporación, sin embargo, es la cobertura de sombreo suspendida (CSS) sobre la balsa la que presenta mayores ventajas. Son escasos los estudios que identifican la mejora de la calidad del agua asociada al uso de CSSs. Craig et al. (2005) y Finn et al. (2007) indicaron mejoras de la calidad del agua almacenada en las balsas mediante el uso de CSSs asociadas con la reducción: (i) del crecimiento normal de algas al disminuir los niveles de luz en la balsa, (ii) de la entrada de suciedad y otras partículas arrastradas por el viento, y (iii) de la salinidad del

El objetivo de este trabajo es determinar el efecto de la instalación de una CSS sobre una balsa de riego de 12.000 m³ sobre los principales factores que determinan la calidad del agua almacenada: temperatura, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto, clorofila, turbidez y algas. Los resultados se comparan con dos cuerpos de agua no sombreados de características similares.

2 Materiales y métodos

2.1 Descripción de las balsas de riego

En septiembre de 2008, se monitorizaron tres balsas de riego ubicadas en la Estación Experimental de Investigación Agroalimentaria “Tomas Ferro” de la Universidad Politécnica de Cartagena (La Palma, Murcia). Una de ellas, llamada B1, se cubrió con una CSS mientras que las otras dos llamadas B2 y B3 permanecieron descubiertas durante la experimentación. La tabla 1 muestra las características de cada balsa, el origen de sus recursos hídricos y la clase de regulación hídrica en cada una de ellas.

2.2 Muestras y mediciones

Mensualmente se recogieron muestras de agua para cada metro (0,5 – 4,5 metros). Las muestras se transportaron al laboratorio en una nevera portátil y se analizó la cantidad de algas.

Adicionalmente se usó una sonda multiparamétrica YSI – Series para realizar un barrido en profundidad y determinar los principales parámetros que determinan la calidad del agua: temperatura, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto, clorofila y turbidez.

Tabla 1.- Características de las balsas de regulación de riego monitorizadas y origen de sus recursos hídricos.

Balsa	Estado	Superficie (m ²)	Profundidad (m)	Recurso hídrico	Regulación
B ₁	Cubierta	50 X 55	5	Trasvase	No
B ₂	Descubierta	120 X 80	5	Trasvase y Desaladora	Diaria
B ₃	Descubierta	30 X 30	6	Trasvase y pozo	Diaria

3 Resultados

3.1 Efectos sobre la temperatura y la conductividad eléctrica

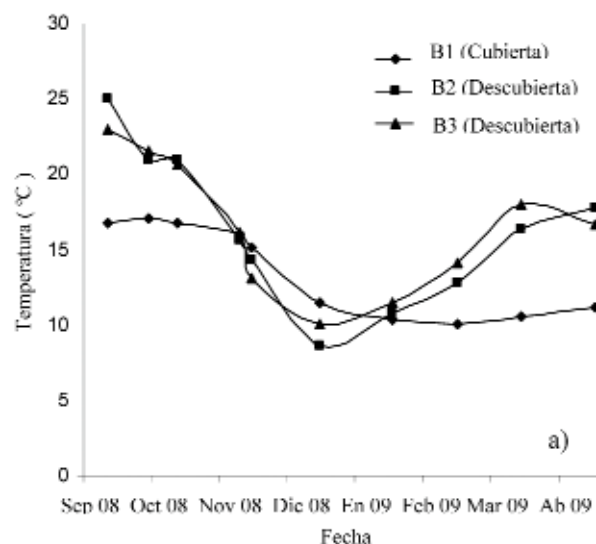
La figura 1 muestra la evolución de la temperatura en las tres balsas para el periodo de estudio. Las temperaturas de B2 y B3 fueron más altas en los meses más cálidos y más bajas en los meses más fríos en comparación con B1. B1 experimentó una estratificación térmica con una diferencia máxima de 5°C en Septiembre. B2 y B3 no mostraron estratificación térmica durante el periodo ensayado. B1 mostró una reducción progresiva de la EC (8 %) como consecuencia del balance positivo hacia agua de lluvia frente a evaporación y a la no regulación de la misma.

3.2 Efectos sobre la clorofila, las algas y el oxígeno disuelto

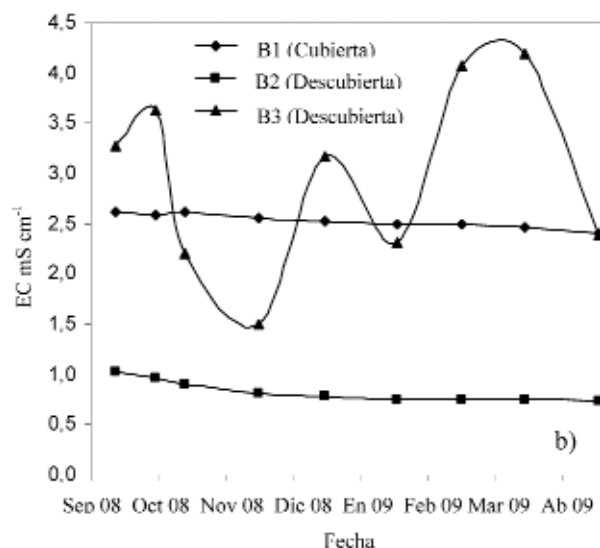
La reducción de la radiación solar incidente sobre el cuerpo de agua al instalar la cobertura produce el cese de la actividad fotosintética en el embalse y una importante disminución del crecimiento y desarrollo de las algas. Así se pone de manifiesto en la figura 1.c, donde se observa unos niveles de clorofila en el embalse B1 prácticamente despreciables, mientras que son bajos en el embalse B3 (con tratamiento alguicida) y mucho mayores en el embalse B2 (sin tratamiento alguicida).

La cobertura resulta tanto o más eficiente que el tratamiento alguicida en el control del *bloom* de algas que se produce durante la primavera en el embalse B2. El conteo de algas y partículas de polvo en suspensión de las muestras tomadas en cada embalse confirma estas conclusiones, por lo que se pone de manifiesto que la aplicación de coberturas también puede implicar beneficios al disminuir la necesidad de filtrado en sistemas de riego localizado.

El nivel de oxígeno disuelto (ODO) en agua (Fig.1d) es otro parámetro que puede condicionar la respuesta agronómica de los cultivos [6]. La reducción de viento bajo la cobertura, la baja producción de oxígeno por parte las escasas algas vivas como consecuencia de la escasa radiación solar incidente y el consumo de oxígeno utilizado en la descomposición de las algas muertas, están determinando unos niveles de ODO notablemente inferiores en el embalse B1 (2 – 3 mg L⁻¹) con respecto a los embalses B2 y B3 (6 – 10 mg L⁻¹).



Así se pone de manifiesto en la figura 1.d, donde los incrementos de ODO en los embalses están relacionados con periodos de fuerte descenso en la temperatura del agua, que incrementan la capacidad del agua para retener ODO.



El recuento de la cantidad de algas manifestó una fuerte reducción cuando la balsa se cubrió con la CSS (datos no mostrados). La concentración de clorofila varió ligeramente en profundidad y fue relativamente baja como consecuencia de la buena calidad del agua de origen para las tres balsas durante el periodo de experimentación.

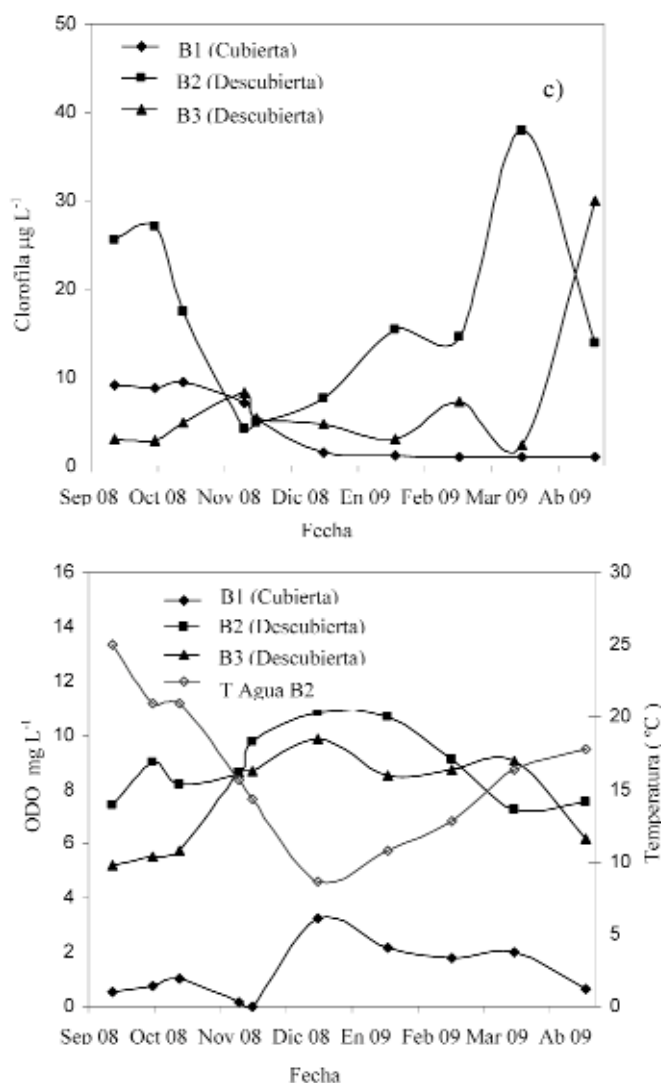


Figura 1. Evolución del valor medio en profundidad de a) temperatura del agua, b) conductividad eléctrica, c) concentración de clorofila y d) oxígeno disuelto para las balsas B1, B2 y B3.

3.3 Efectos sobre la turbidez

El nivel en los tres embalses es bajo como consecuencia de la baja turbidez (0 – 100 NTU) del agua con que se abastecen. A pesar de ello, el embalse cubierto muestra valores muy inferiores (0 – 5 NTU) con respecto a los embalses B2 y B3 (2 – 100 NTU).

Este resultado es consecuencia de la reducción en la deposición de partículas arrastradas por el viento en el embalse cubierto, de la menor agitación del agua en el mismo, y de la mencionada reducción en la cantidad de algas. Este resultado confirma que la aplicación de coberturas puede implicar una significativa disminución en las necesidades de filtrado para riego localizado.

4 Conclusiones

El uso de CSS sobre la balsa B1 modificó el comportamiento térmico de la masa de agua induciendo una mayor estratificación térmica

empezando en primavera y terminado en otoño. La alta reducción de la evaporación produjo una continua disminución de la EC del agua de riego.

Se limitó la actividad fotosintética y el crecimiento de algas como consecuencia de una reducción de la radiación solar incidente. La concentración de ODO en el agua almacenada en la balsa alcanzó valores característicos de una situación anóxica (2 – 3 mg L⁻¹). Estos resultados muestran que la instalación de CSSs sobre balsas de riego mejoran la calidad del agua para su uso en sistemas de riego localizado y alta presión donde agua con bajos niveles de algas es necesaria para el correcto funcionamiento de los sistemas de riego y equipos de filtrado.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Fundación Séneca (Murcia, España) y al Ministerio de Educación y Ciencia (España) la financiación de este trabajo de investigación mediante los proyectos 02978/PI/05 y PET2005_0056 respectivamente.

Referencias

- [1] Craig, I., Green, A., Scobie, M., Schmidt, E., (2005). Controlling Evaporation Loss from Water Storages. NCEA Publication No. 1000580/1, Queensland, pp. 207.
- [2] EGDH, 2007. Estudio General sobre la Demarcación Hidrográfica del Segura. Cuenca del Segura, Murcia (España), 359 pp. Disponible en: <http://www.chsegura.es>
- [3] Finn, N., Barnes, S., (2007). The benefits of shade-cloth covers for potable water storages. CSIRO Textile & Fibre Technology. CSIRO Gale Pacific, 42 pp.
- [4] Martínez Álvarez, V., González-Real, M.M., Baille, A., Maestre Valero, J.F., Gallego Elvira, B., (2008). Regional Assessment of Evaporation from Agricultural Irrigation Reservoirs in a Semiarid Climate. Agr. Water Manage. 95, 1056-1066.
- [5] Ravina, I., Paz, E., Sofer, Z., Marcu, A., Schischa, A. and Sagi, G., (1992). Control of emitter clogging in drip irrigation with reclaimed wastewater. Irrig. Sci., 13: 129-139.
- [6] Raviv, M., Wallach, R., Blom, T.J., 2004. The effect of physical properties of soilless media on plant performance. A review. Acta Horti. 644, 251-259.

Eficiencia de las coberturas de sombreo para reducción de las pérdidas por evaporación en embalses de riego bajo condiciones de clima semiárido

Gallego Elvira B.; Maestre Valero J.F.; Martínez Álvarez, V.
Universidad Politécnica de Cartagena, Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica
Dpto. de Ing. de los Alimentos y del Equip. Agrícola, Área Agroforestal
Paseo Alfonso XIII, 48, 30203 Cartagena (Murcia)
Teléfono: 968 32 7052, Fax: 968 32 7031
E-mail: belen.gallego@upct.es

Resumen. En regiones áridas o semiáridas con una alta demanda evaporativa, las pérdidas de agua por evaporación en embalses de riego agrícolas, pueden suponer un importante porcentaje del total de agua almacenada. En este estudio se evalúa la eficiencia de reducción de la evaporación de las coberturas de sombreo suspendidas de polietileno negro de doble capa bajo las condiciones climáticas semiáridas del sureste español. Con este objetivo, se registraron los valores diarios de evaporación en un embalse de riego sombreado característico de la zona de estudio. Los resultados muestran una reducción de la evaporación del 84% y una permeabilidad a las precipitaciones del 87%.

1 Introducción

En el actual contexto de escasez de recursos hídricos en zonas áridas y semiáridas como el sureste español, es imprescindible alcanzar una máxima eficiencia de uso del agua. En la Cuenca del Segura, el aumento de la demanda de agua para agricultura, que supone el 80% de la demanda hídrica total, ha provocado una situación de déficit hídrico, estimado en 460 hm³, que afecta a las mas de 2.7·10⁵ ha de cultivo de la cuenca del Segura. Debido a la alta demanda evaporativa, la pérdida de agua por evaporación en embalses de riego representa un importante porcentaje del volumen de agua que regulan. Martínez Álvarez et al. (2008) estimaron que las pérdidas de agua en los mas de 15000 embalses de la cuenca del Segura alcanzaban los 60·10⁶ m³ anuales, cifra que supone el 8,3% de los recursos hídricos destinados a riego agrícola en la cuenca.

Una prometedora técnica para minimizar las pérdidas por evaporación es el empleo de coberturas porosas de sombreo suspendidas en estructuras reticulares ancladas perimetralmente a las balsas, que reducen drásticamente la incidencia de la radiación solar y el viento sobre el cuerpo de agua. La eficiencia de reducción de la evaporación de esta técnica fue evaluada por Craig et al. (2008) en un gran embalse (3,8 ha y 3 m de profundidad) ubicado en una región con alta evaporación potencial (2200 mm año⁻¹) en el sureste de Queensland (Australia), obteniendo reducciones del 80-87% en los meses de verano. En el sureste español, esta técnica ha sido experimentada a pequeña escala [2] obteniéndose reducciones de la evaporación superiores al 80% para tanques evaporímetros clase-A.

El principal objetivo de este trabajo es evaluar la eficiencia de reducción de las pérdidas por

evaporación a escala real en un embalse de riego sombreado con textil de polietileno de doble capa, bajo las condiciones climáticas características del sureste español.

2 Materiales y métodos

2.1 Embalse de riego experimental

El embalse de riego de agrícola monitorizado se sitúa en el sureste español (37°35'N, 0°59'W) y tiene unas dimensiones (área: 2400m², profundidad: 5m) representativas de los embalses de riego ubicados en la cuenca del Segura. La cobertura de sombreo evaluada fue un textil de polietileno negro de doble capa (ATARSUN, ATARFIL S.L.) suspendido de una estructura de cables de poliamida.

2.2 Adquisición de datos de evaporación y meteorológicos

Durante el periodo Abril 2008 – Marzo 2009, la evolución de lámina de agua y las diferentes variables meteorológicas bajo y sobre la malla se midieron continuamente mediante un sistema de adquisición datos automático. Los datos se escanearon cada 10 segundos y se registraron los valores medios cada 10 minutos, a partir de los cuales se determinaron los valores medios diarios de todas las variables del estudio.

La variación de la lámina de agua se registró con un sensor de presión de alta precisión (Druck PDCR1830). Los datos de radiación solar (Kipp & Zonnen CMP 11 piranometer) y viento (Vector Instruments A100R anemometer) a 2 m de altura se obtuvieron en una estación localizada a 50 metros del embalse. Para determinar la transmisión de la radiación solar y la reducción del viento bajo malla, se

midieron la radiación solar y el viento, con un piranómetro (Kipp & Zonnen CMP 6 piranometer) y sensor de conductancia (wind speed prototype sensor BLC-Y, UPCT) respectivamente, instalados en un flotador bajo la cobertura.

2.3 Cálculo de la evaporación potencial

Para evaluar la reducción de la evaporación, se estimó la evaporación en el embalse descubierto a partir de las variables climáticas mediante un modelo de balance de energía [3].

3 Resultados

El total de agua evaporada durante el año de estudio en el embalse sombreado fue 192 mm, mientras que la evaporación estimada para el embalse descubierto fue 1202 mm (Fig. 1), lo que equivale a una reducción de la evaporación del 84%. La precipitación total en el periodo experimental fue 576 mm, registrándose en el embalse una correspondiente subida de nivel de 498 mm, lo que implica que la cobertura permitió el paso del 87% de las lluvias.

La alta eficiencia de la malla de sombreado en la reducción de la evaporación esta principalmente relacionada con la baja transmisión de la radiación solar y la alta protección frente al viento. La radiación solar sobre la superficie del agua disminuyó un 99% (Fig. 2.a) y los valores de velocidad de viento descendieron un 85% (Fig. 2.b).

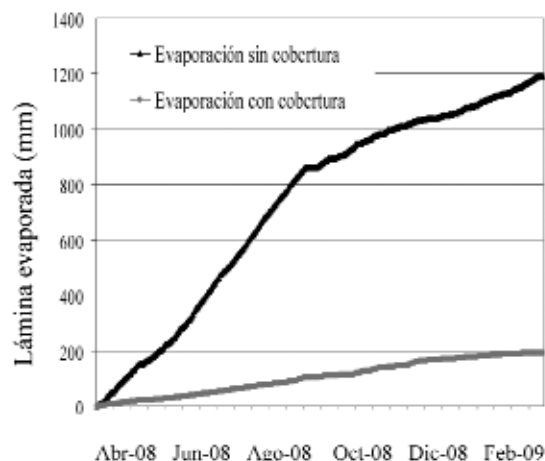


Figura 1. Altura de lámina de agua evaporada medida en el embalse sombreado y modelizada en el embalse descubierto. Los días con presencia de precipitaciones se ha considerado una tasa de evaporación nula. Se ha considerado una tasa de evaporación nula para días con presencia de precipitaciones.

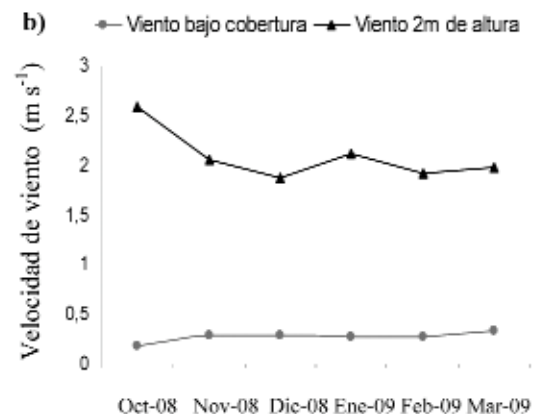
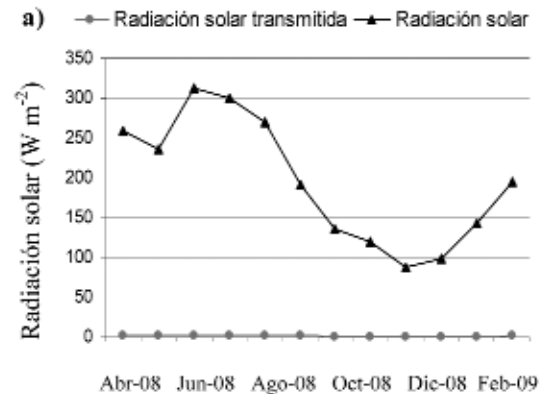


Figura 2. Comparación de valores medios mensuales de (a) radiación solar y radiación solar transmitida y (b) velocidad de viento a 2 m y bajo la cobertura.

4 Conclusiones

Las coberturas de sombreado de polietileno negro suspendidas son una técnica eficaz para la reducción de pérdidas por evaporación en embalses de riego en la cuenca del Segura. Además al tratarse de un textil poroso permiten el paso de agua de lluvia.

Las principales características de la malla en relación a la mitigación de la evaporación son su baja transmisividad de radiación solar y alta protección frente al viento.

El estudio de viabilidad económica de la aplicación de esta técnica de reducción de la evaporación puede encontrarse en Martínez et al. (2009).

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Fundación Séneca (Murcia, España) y al Ministerio Educación y Ciencia (España) la financiación trabajo de investigación mediante los proyectos 02978/PI/05 y PET2005_0056 respectivamente.

Referencias

- [1] I. Craig, A. Green, M. Scobie y E. Schmidt. (2005). "Controlling Evaporation Loss from Water Storages", National Centre for Engineering in Agriculture Publication No 1000580/1, Queensland (Australia).
- [2] V. Martínez Alvarez, A. Baille, J.M. Molina Martínez, M.M. González-Real, (2006). "Efficiency of shading materials in reducing evaporation from free water surfaces". *Agr. Water Manage.* 84, 229-239.
- [3]. V. Martínez Alvarez, M.M. González-Real, A. Baille, J.M. Molina Martínez, (2007). "A novel approach for estimating the pan coefficient of irrigation water reservoirs". Application to South Eastern Spain. *Agr. Water Manage.* 92, 29-40.
- [4]. V. Martínez Alvarez, M.M. González-Real, A. Baille, J.F. Maestre Valero, B. Gallego Elvira, (2008). "Regional assessment of evaporation from agricultural irrigation reservoirs in semiarid climate". *Agr. Water Manage.* 29, 1056-1066.
- [5] V. Martínez Alvarez, J. Calatrava Leyva, J.F. Maestre Valero, B. Martín Gorriz (2009). "Economic assessment of shade-cloth covers for agricultural irrigation reservoirs in a semiarid climate". *Agr. Water Manage.* En prensa.

Utilidad de la medida de flujo de savia como indicador de la tasa de transpiración en plantas de pepino

Gregorio Egea, Pedro A. Nortes, Alain Baille, Bernardo Martín, María M. González-Real
 Área de Ingeniería Agroforestal. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica
 Paseo Alfonso XIII, 48, 30203 Cartagena (Murcia)
 Teléfono: 968 32 70 52 Fax: 968 32 7031
 E-mail: gregorio.egea@upct.es

Resumen. El método del balance de calor para la determinación del flujo de savia es particularmente adecuado para especies vegetales con pequeños tallos. Sin embargo, se desconoce en qué medida el flujo de savia medido en la base del tallo realmente reproduce los cambios rápidos de transpiración que se producen ante variaciones bruscas de las condiciones medioambientales. En este estudio, se compararon medidas de transpiración foliar obtenidas mediante un método no invasivo (balance de energía a nivel de la hoja) con medidas de flujo de savia determinadas mediante el método de balance de calor en plantas de pepino cultivadas bajo invernadero. Los resultados indicaron que la medida de flujo de savia permite estimar de forma precisa la tasa de transpiración a escala diaria, mientras que a escalas de tiempo inferiores (horaria o inferior) ambos flujos pueden diferir debido al papel que desempeñan las reservas de agua internas de la planta en el proceso de transpiración.

1 Introducción

El conocimiento de las necesidades hídricas de las plantas es un requisito fundamental para una correcta programación del riego en cultivos bajo invernadero, especialmente cuando se utilizan sistemas de cultivo 'sin suelo' (*soilless culture*) que requieren altas frecuencias de riego. En estos sistemas, el limitado volumen de sustrato así como la baja capacidad de almacenamiento de agua de la mayoría de los sustratos artificiales, requieren que se disponga de métodos precisos de control de los aportes de agua al cultivo.

Para determinar las necesidades hídricas de la planta bajo condiciones de invernadero se han desarrollado algoritmos más o menos simplificados basados en diversos factores fisiológicos y ambientales (Baille et al., 1994). Sin embargo, las diferencias entre especies y variedades, la influencia de la ontogenia sobre las relaciones hídricas del cultivo, así como la variabilidad en la tipología de invernaderos y medios de cultivo dificultan la aplicabilidad de estos algoritmos a nivel comercial. Por lo tanto, las técnicas que permiten monitorizar en tiempo real el uso de agua por las plantas representan una herramienta valiosa aplicable a la optimización del riego y el control climático en invernadero.

La aplicación del método de balance de calor para determinar el flujo de savia que circula a través de un tallo (Sakuratani, 1981), es una técnica adecuada para estimar el uso de agua de plantas herbáceas con tallos pequeños. Varios autores han documentado la existencia de desfases temporales entre las tasas de transpiración y de flujo de savia en plantas leñosas (Zweifel et al., 2001), que pueden derivar en errores cuando la tasa de transpiración se estimada a partir de

medidas de flujo de savia. Estas diferencias indican que el proceso de transferencia de agua en la planta responde a condiciones de régimen no estacionario, como consecuencia de la contribución al proceso de transpiración de las reservas internas de agua de la planta.

El objetivo del presente estudio fue evaluar si las medidas de flujo de savia obtenidas en tallos de plantas de pepino en cultivo sin suelo y bajo invernadero ofrecen una estima precisa de la tasa de transpiración a corto plazo.

2 Materiales y métodos

El ensayo se realizó en un invernadero de cristal ubicado en la Estación Experimental 'Tomás Ferro' (La Palma, Cartagena). El material vegetal utilizado fueron plantas de pepino (*Cucumis sativus* L. cv. Anico) cultivadas en contenedores de poliestireno (37,6 cm x 17,6 cm x 12 m) rellenos con perlita. Las plantas se transplantaron a comienzos de abril con una densidad de plantación de 2 plantas por m² de suelo.

Las medidas se realizaron durante un período de 15 días (1 mayo-14 mayo). La tasa de flujo de savia (FS) se midió en la base del tallo mediante la técnica de balance de calor (Sakuratani, 1981), para lo que se utilizó un sensor comercial (modelo SGA-9, Dynagage®, Dynamax Inc., USA). Encima del sensor de flujo de savia se instaló un sensor LVDT (Solartron Metrology, UK) para determinar las variaciones diarias del diámetro del tallo. En la misma planta se monitorizó la tasa de transpiración foliar (E_f) mediante un método no invasivo basado en el balance de energía de la hoja (Bunce, 2006). Este método estima la conductancia a la transferencia de calor de la capa límite (g_{Ha}) a partir del balance de

energía de una réplica metálica (estaño) de hoja ubicada a la misma altura y orientación que una hoja real. Asumiendo que ambos tipos de hoja presentan la misma g_{H_0} , E_t puede calcularse como el término residual de la ecuación de balance de energía de la hoja. Las medidas requeridas para la aplicación del método son: temperatura y radiación neta de ambos tipos de hoja (real y réplica), temperatura del suelo, radiación solar encima de la planta, velocidad del viento a la altura de la planta y temperatura de bulbo húmedo y bulbo seco del aire. Todas las medidas fueron registradas cada 10 min con 2 sistemas de adquisición de datos y multiplexores (Campbell Sci. Instr. USA).

Dado que la superficie foliar total de la planta (A_p) al final del período de estudio fue relativamente pequeña ($\approx 0,5 \text{ m}^2 \text{ planta}^{-1}$), y por lo tanto el sombreado mutuo entre hojas despreciable, la tasa de transpiración a escala de la planta (E_p) se estimó a partir de la relación:

$$E_p = E_t \times A_p \quad [\text{Ec. 1}]$$

donde A_p (m^2) representa la superficie foliar total de la planta. A_p fue determinada cada 2-3 días usando una relación de tipo alométrico.

Las variaciones en las reservas internas de agua de la planta fueron estimadas a partir de la ecuación:

$$\Delta Q = FS - E_p \quad [\text{Ec. 2}]$$

3 Resultados y Discusión

A escala diaria se observó una estrecha relación lineal entre los valores de FS y E_p (Fig. 1, $R^2 = 0,95$, pendiente = 0.89), lo que indica que los sensores de balance de calor proporcionaron estimas de la transpiración diaria comparables a las del método no invasivo.

Con el objetivo de analizar la dinámica a corto plazo de FS y E_p se han seleccionado dos días representativos del período de estudio (Figs. 2 y 3) en los que se observaron cambios rápidos y bruscos en las condiciones medioambientales. Durante estos días, los flujos FS y E_p presentaron fuertes fluctuaciones (Figs. 2a y 3a) en respuesta a las variaciones climáticas registradas, si bien no se apreció ningún desfase temporal entre ellos. A pesar de esta sincronización observada entre FS y E_p , la magnitud de ambos flujos difirió sensiblemente en ciertos momentos del día, generalmente coincidentes con cambios repentinos en las condiciones climáticas. Estas diferencias entre FS (oferta hídrica) y E_p (demanda hídrica), previamente observadas en plantas bien regadas (Zweifel et al., 2001), pueden ser explicadas por la contribución de las reservas hídricas internas de la planta al flujo de transpiración (Schulze et al., 1985).

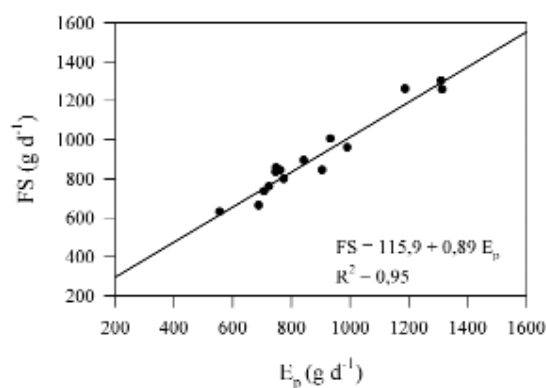


Figura 1. Relación entre la tasa diaria de flujo de savia (FS) y la tasa diaria de transpiración a escala de la planta (E_p).

Una forma de cuantificar las variaciones de agua almacenada en la planta en un momento determinado es a través de la ecuación 2, de manera que valores positivos o negativos de ΔQ representan, respectivamente, recarga o agotamiento de las reservas hídricas internas. La evolución diaria de los valores acumulados de ΔQ ($\Sigma(\Delta Q)$) permitió cuantificar la variación en contenido de agua que experimenta la planta a lo largo del día (Figs. 2b, 3b).

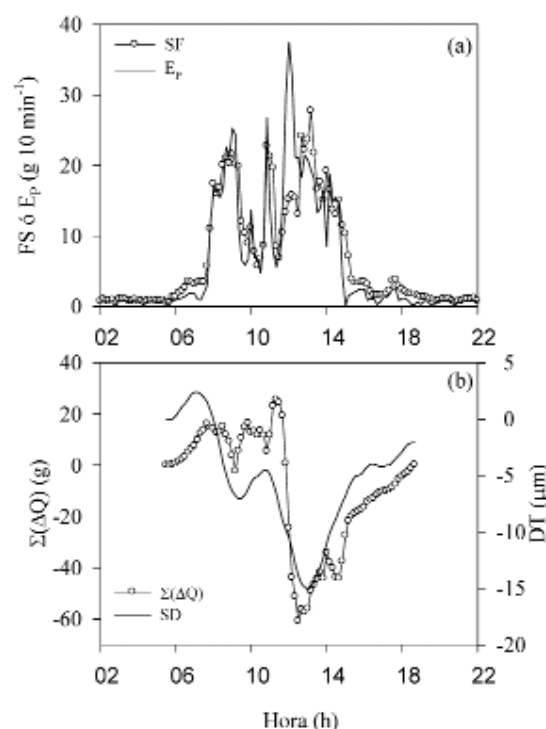


Figura 2. (a) Evolución diaria de las tasas de flujo de savia (FS) y transpiración a escala de la planta (E_p); (b) Variación acumulada de las reservas hídricas internas de la planta ($\Sigma(\Delta Q)$) y variación diaria del diámetro del tallo (DT). Día del año 131.

El paralelismo encontrado entre las tendencias diarias del diámetro de tallo (DT) y $\Sigma(\Delta Q)$ (Figs. 2b, 3b), confirmó la contribución de las reservas internas de

agua de los órganos de la planta (p.e. tallo, hojas, frutos, etc.) al proceso de transpiración. La contribución total de estas reservas al flujo diario de F_p varió en el rango 7-12% durante el periodo de estudio.

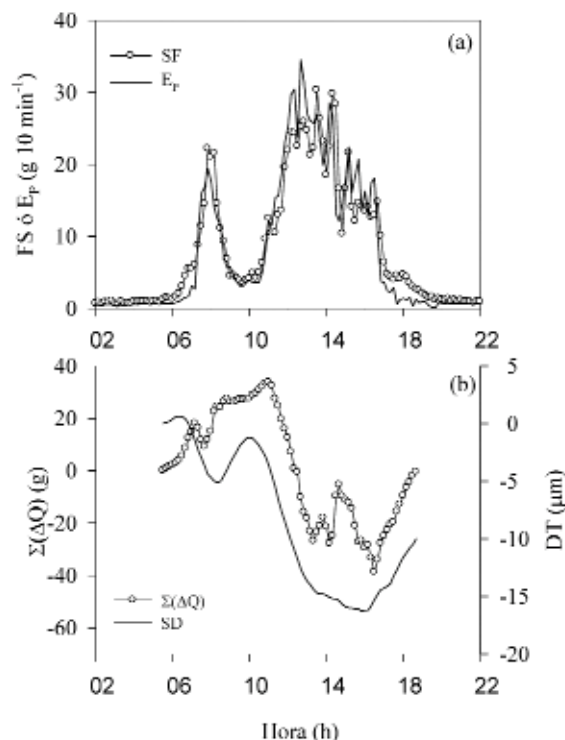


Figura 3. (a) Evolución diaria de las tasas de flujo de savia (FS) y transpiración a escala de la planta (E_p); (b) Variación acumulada de las reservas hídricas internas de la planta ($\Sigma(\Delta Q)$) y variación diaria del diámetro del tallo (DT). Día del año 132.

4 Conclusiones

El flujo de agua en la planta responde a condiciones de régimen no estacionario, lo que explica que la repuesta de FS a las variaciones de demanda atmosférica esté amortiguada con respecto a E_p . Estos resultados sugieren que la medida de FS debe ser interpretada con precaución cuando se utiliza como indicador de la tasa de transpiración a corto plazo (escala horaria o inferior), especialmente cuando se requieren medidas precisas de transpiración (p.e. cálculo de la conductancia estomática, calibración de modelos de transpiración ó manejo del riego en sistemas de cultivo sin suelo).

Agradecimientos

Los autores agradecen la financiación recibida por la CICYT (proyecto AGL2005-06492-C03-02/AGR) para la realización del presente trabajo.

Referencias

- [1] Baille, M., Baille, A., Laury, J. C. 1994. A simplified model for predicting evapotranspiration rate of nine ornamental species vs. climate factors and leaf area. *Sci. Hort.* 59:217-232.
- [2] Bunce, J.A. 2006. Use of a minimally invasive method of measuring leaf stomatal conductance to examine stomatal responses to water vapour pressure difference under field conditions. *Agric. Forest Meteorol.* 139:335-343.
- [3] Sakuratani, T. 1981. A heat balance method for measuring water flux in the stem of intact plants. *J. Agric. Meteorol.* 37:9-17.
- [4] Schulze, E.D., Cermák, J., Matyssek, R., Penka, M., Zimmermann, R., Vasicek, F., Gries W., Kučera, J. 1985. Canopy transpiration and water fluxes in the xylem of the trunk of *Larix* and *Picea* trees—a comparison of xylem flow, porometer and cuvette measurements. *Oecologia* 66:475-486.
- [5] Zweifel, R., Item, H., Häslér, R. 2001. Link between diurnal stem radius changes and tree water relations. *Tree physiol.* 21:869-877.

Modelización hidrológica e hidráulica y sistemas de captación en cauces efímeros

Maria Dolores Marín Martín, Luis G. Castillo Elsitdié
Grupo I+D+i Hidir@m - www.upct.es/hidrom
Ingeniería Hidráulica, Marítima y Medio Ambiental, UPCT.
Paseo Alfonso XIII, 52, 30203 Cartagena (Murcia)
E-mail: alisa282@gmail.com, luis.castillo@upct.es

Resumen. Uno de los efectos más directos del cambio climático es el hecho de que llueve con menor frecuencia y con mayor intensidad, lo que provoca la aparición de un mayor número de episodios de flujos torrenciales. En este artículo se describen los trabajos, y metodologías que se pretenden emplear en la modelización hidrológica e hidráulica, para el diseño de elementos de captación en cauces efímeros.

1 Introducción

Las zonas semiáridas se caracterizan por contar con una pluviometría irregular, lo que confiere entre otras características una cobertura vegetal reducida o casi ausente.

El cambio climático está provocando un efecto directo sobre la frecuencia e intensidad de la precipitación, de manera que actualmente en estas zonas se producen lluvias más intensas y menos frecuentes.

Si conjugamos estos dos elementos, lluvias torrenciales y zonas potencialmente erosionables, se explica la existencia de flujos torrenciales cada vez más acusados en las regiones semiáridas.

El estudio de sistemas de captaciones específicos para regiones semiáridas se justifica principalmente por tres motivos. Por una parte los flujos torrenciales no pueden captarse con los sistemas habituales empleados como presas o embalses, pues dado el alto transporte de sedimentos que arrastran quedarían inutilizables en poco tiempo. En segundo lugar con este tipo de estructuras se conseguiría minimizar los efectos destructivos que tienen los flujos torrenciales. Y por último, pero no por ello menos importante, la captación de un recurso tan importante y escaso en estas regiones como el agua.

Encontramos en España algunas experiencias del estudio y diseño de sistemas de captación, como el existente en el barranco de las Angustias sito en la Isla de la Palma (Canarias). Teniendo en cuenta la problemática, y basándonos en los principales resultados que de estos estudios se ha publicado (Castillo et al., 2000, 2000 b, Castillo, 2004), se pretenden obtener la generalización de parámetros de diseño para sistemas de captación en zonas semiáridas.

Para llegar al análisis de los parámetros de diseño de los posibles sistemas de captación, se han de realizar una serie de trabajos como son: Caracterizar los procesos geomorfológicos, hidrológicos e hidráulicos en las regiones semiáridas a diferente escala temporal y espacial; evaluar las diferentes formulaciones de transporte de sedimentos, seleccionando los más adecuados para las regiones semiáridas; evaluar las diferentes formulaciones para la caracterización de los coeficientes de rugosidad y macrorugosidad en el cauce, seleccionando las más adecuadas y considerando su acoplamiento con las formulaciones de transporte de sedimentos.

2 Modelos hidrológicos

Con objeto de poder llevar a acabo la adecuada caracterización de tipo geomorfológico, hidrológico e hidráulico en las regiones semiáridas, se analizarán las cuencas y tramos de cauces, en función de las posibilidades de captación y almacenamiento, así como la facilidad de instalar la instrumentalización adecuada y poder realizar medidas directas de los diferentes eventos, seleccionando las más idóneas como cuencas piloto.

Para su selección se tendrá en cuenta, también, la información histórica existente, tal como registro de caudales, avenidas históricas, precipitaciones máximas, etc., de manera que permita efectuar la calibración de los modelos hidrológicos e hidráulicos.

En un primer análisis, se hará el estudio mediante el modelo agregado y de eventos HEC-HMS desarrollado por el Hydrologic Engineering Center del US Army Corps of Engineers, con la extensión HEC-GeoHMS, lo que nos permite conectar con los sistemas de información geográfica tales como ArcGIS (HEC-HMS User's Manual, 2008 y HEC-GeoHMS11 User's Manual, 2003).

En la Fig. 1, a modo de ejemplo, se pueden ver los hidrogramas de avenidas que se obtuvieron en el

“Estudio de inundabilidad de la zona norte de la confluencia de las ramblas de Los Dolores y Los Barreros con la de Benipila y estudio de soluciones” (Castillo, 2007), utilizando el programa HEC-HMS.

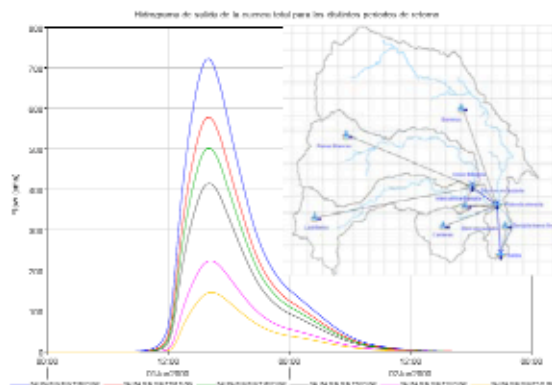


Figura 1. Salida del programa HEC-HMS. Hidrogramas calculados en la cuenca de Benipila.

Posteriormente, se analizará la cuenca aplicando un modelo de tipo distribuido, físicamente basado, para lo que se utilizará el programa MIKE-SHE (ver Fig. 2), aplicación desarrollada por el Danish Hydraulic Institute (Dinamarca).

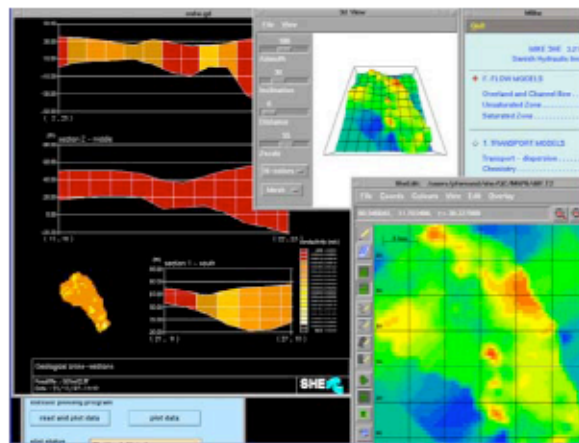


Figura 2. Salidas gráficas del programa MIKE-SHE.

Como conclusión de esta fase de modelización hidrológica, los resultados obtenidos por ambos modelos se contrastarán y analizarán la equivalencia de los diferentes parámetros y qué tipo de información resulta más relevante, así como el nivel de detalle necesario para una adecuada caracterización de las cuencas en las zonas semiáridas.

3 Cálculo del caudal dominante, coeficientes de rugosidad y transporte de sedimentos

Una vez caracterizado el proceso hidrológico en las cuencas semiáridas, será necesario calcular el transporte de sedimentos. Para lo que se tendrán en cuenta los siguientes conceptos.

Según Wan y Wang (1994) y acuerdo con la concentración volumétrica de sedimentos y la pendiente longitudinal del tramo de cauce, los flujos se pueden clasificar como hiperconcentrados o de barros y escombros (mudflow). En las regiones semiáridas usualmente se suelen presentar flujos hiperconcentrados.

El transporte se puede dividir en carga de lavado “wash load” que comprende material muy fino y se transporta exclusivamente en suspensión, y la carga de material de fondo “bed load” que se transporta por el fondo y también en suspensión, dependiendo del tamaño del sedimento y de la velocidad del flujo.

Dado que es el transporte de sedimentos de fondo quien define el cauce, se define como **caudal dominante** a aquel que fluyendo como caudal constante todo el año transportaría el mismo volumen de sedimentos de fondo total. En general, el caudal dominante corresponde con la máxima avenida ordinaria, es decir, a una avenida con un período de retorno entre 1 y 2 años (Richards, 1982). Sin embargo, en el caso de ríos torrenciales e inestables desde el punto de vista hidrológico, el caudal dominante podría incluso llegar a corresponder a un período de retorno de 7 años, tal como ocurre en algunos ríos mediterráneos (Martín Vide, 1997).

Para las cuencas piloto se obtendrán los caudales dominantes, siguiendo la metodología utilizada en el barranco de las Angustias, y que se puede ver en la Fig. 3 (Castillo et al., 2000).

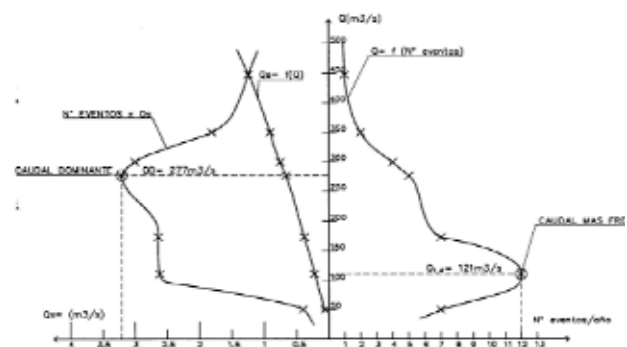


Figura 3. Caudal dominante. Barranco de las Angustias (Caldera de Taburiente, Isla de la Palma).

Para caracterizar adecuadamente este tipo de flujos hiperconcentrados se establecerán las formulaciones de transporte de sedimentos que acopladas a las formulaciones de macrorugosidad se consideren las más adecuadas. Se seguirá la metodología establecida y aplicada en el Barranco de las Angustias ya descrita (Castillo 2004, 2007). En ella se calcula el coeficiente de resistencia mediante varias formulaciones al uso y se analiza los resultados obtenidos (ver Fig. 4).

Seguidamente se calculará el transporte de sedimentos de acuerdo con las formulaciones que

mejor se puedan aplicar a este tipo de casos, analizándose los resultados obtenidos (ver Fig. 5 y 6).

Para la evaluación de las diferentes formulaciones de transporte de sedimentos y de los coeficientes de resistencia, básicamente se requiere dos tipos de información. Una de tipo granulométrico del material del lecho del cauce como son los diámetros

característicos, y otra de tipo hidráulico a través de las características del flujo. Una vez evaluadas las diferentes formulaciones se seleccionarán aquellas que se demuestren más adecuadas y se aplicarán a la cuenca piloto. Con ello se calcularán para cada periodo de retorno diferentes hidrogramas y sedimentogramas.

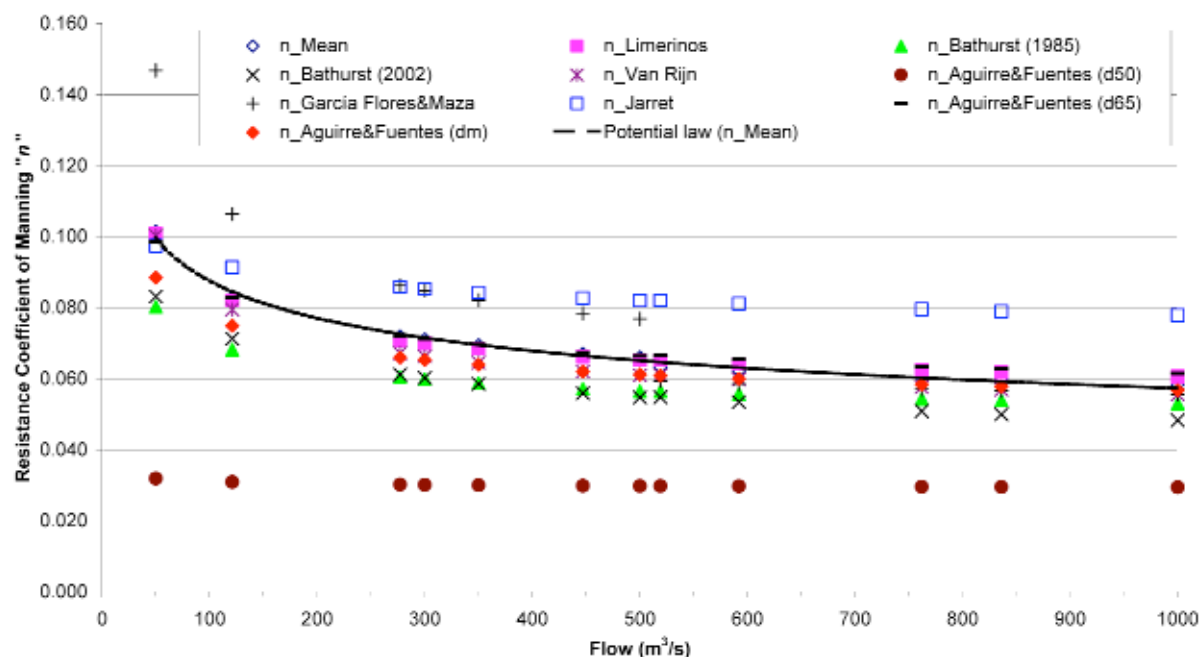


Figura 4. Coeficiente de resistencia de Manning n en función del caudal. Barranco de las Angustias (Isla de la Palma).

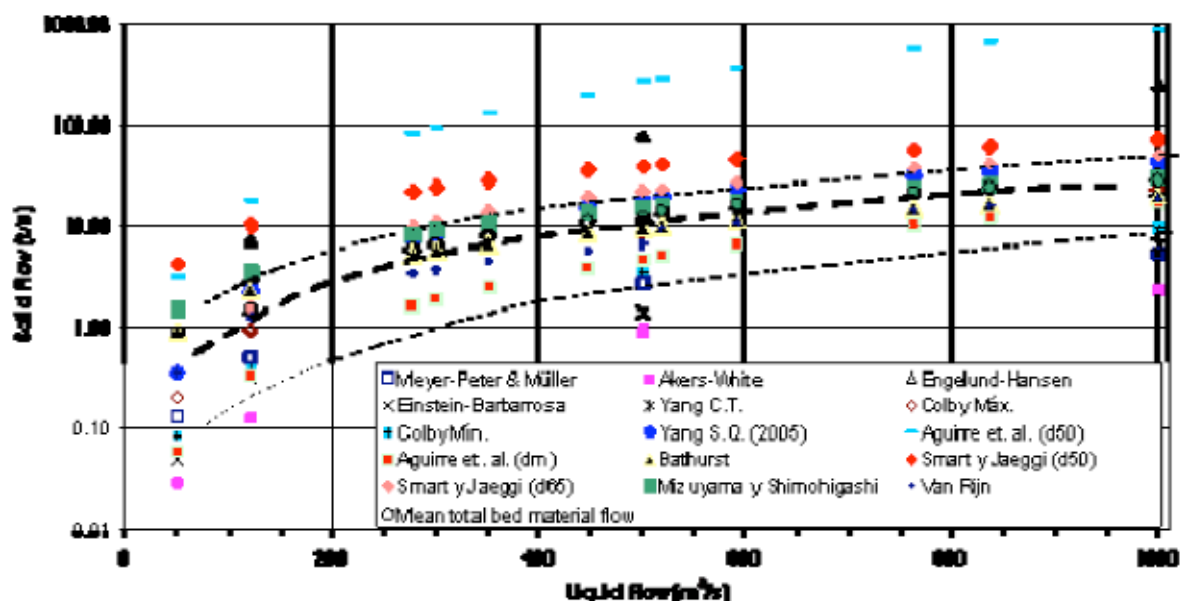


Figura 5. Caudal sólido en función del caudal líquido, calculado con diversas formulaciones de transporte de sedimentos. Barranco de las Angustias (Isla de la Palma).

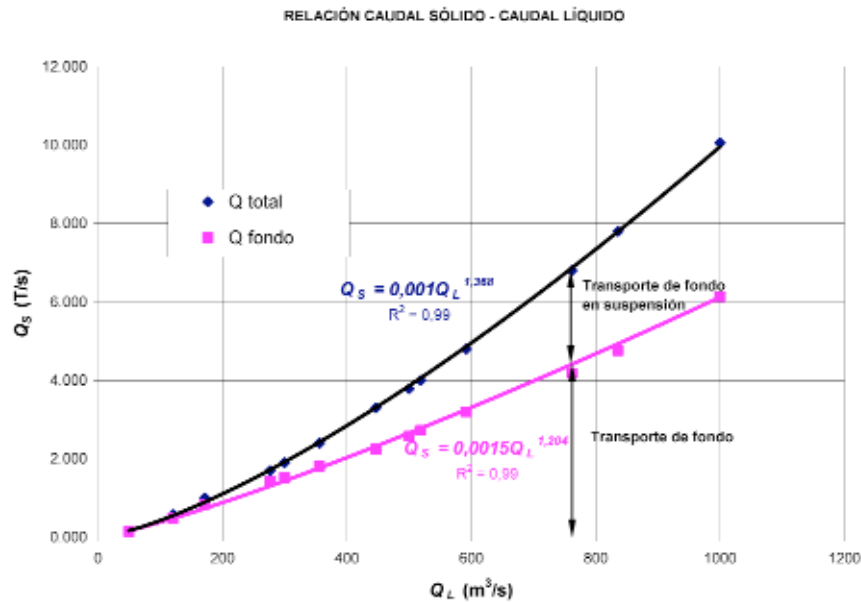


Figura 6. Transporte de fondo y transporte de fondo en suspensión. Barranco de las Angustias (Isla de la Palma).

6 Estudio de los sistemas de captación

Basándonos en los diseños de sistemas de captación que existen en el barranco de las Angustias (Fig. 7), y en la experiencia internacional de países como Alemania, Suiza, ex Unión Soviética, etc. en la captación de caudales de ríos de montaña mediante obras llamadas Tomas Tirolsas o Caucasianas (Fig. 8), el sistema de captación a diseñar tendría que contar con los siguientes elementos:

- Azud o vertedero de pequeña altura con sistemas de rejilla de fondo y cámara de recolección.
- Canal lateral de recolección.
- Decantador de doble cámara vertical
- Balsa de almacenamiento
- Encauzamiento del cauce

Como la información que existe se ha establecido en modelos hidráulicos de captación de ríos de montaña con moderado transporte de sedimentos y pequeños caudales de captación, seguidamente se comprobará si alguno de estos diseños es idóneo para el caso flujos hiperconcentrados y qué modificaciones será necesario realizar.

Se comprobará teórica y experimentalmente los parámetros de diseño y sus rangos de validez, y se propondrán mejoras en los métodos de diseño para ampliar los rangos de caudales de captación.

Es imprescindible para ello establecer los volúmenes de captación de manera que el nivel de garantía sea suficiente, para lo se tendrá que analizar la interrelación hidrológica e hidráulica de la captación.

Todo ello se comprobará mediante modelos numéricos y modelos físicos reducidos. En cuanto a los modelos numéricos se analizarán dos tipos: tipo Euleriano (FLUENT, CFX) o Lagrangiano (SPII).

Para la calibración de los diferentes variables de cálculo y la estandarización de los diferentes parámetros de diseño de la captación, será necesario construir modelos físicos reducidos a diferente escala, con los cuales se analizará principalmente, el comportamiento de los sistemas de desbaste (rejillas), canal de alta velocidad, desarenador y la zona de encauzamiento.



Figura 7. Tomadero de Dos Aguas (Isla de la Palma).

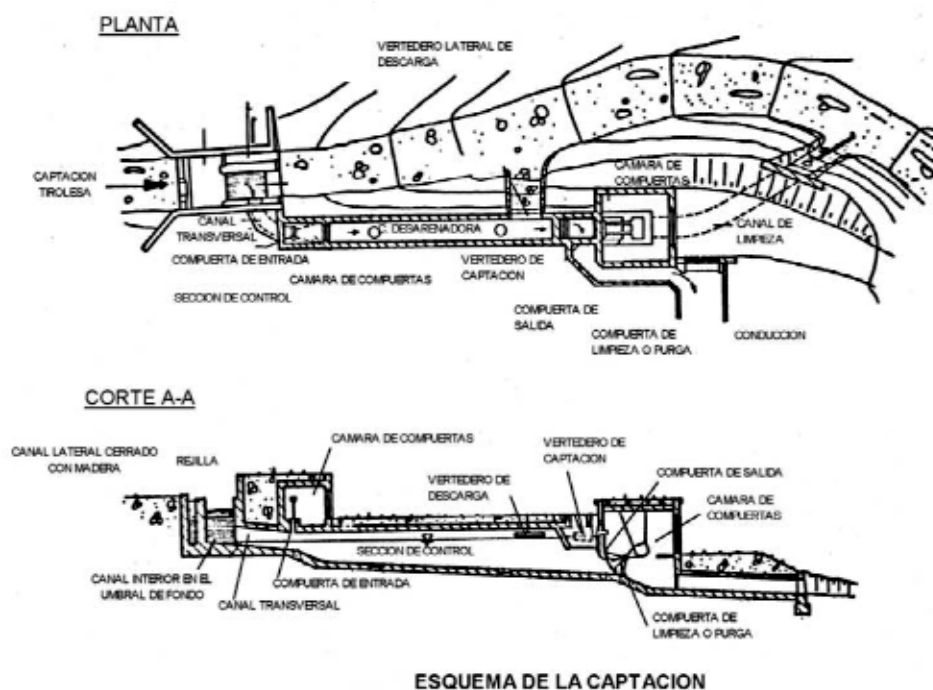


Fig.8 Sistema de captación tipo Tirolés. Adaptado desde Drobir (1981).

Agradecimientos

Este Proyecto de investigación está financiado por la Dirección General de Universidades y Política Científica de la Región de Murcia - Instituto Euromediterráneo del Agua, IEA. Convenio 2602/09-C/TF.

Referencias

- [1] Castillo, L., Santos, F., Ojeda, J., Calderón, P., Medina, J.M. *Estimación de los coeficientes de resistencia, transporte de sedimentos y caudal dominante en el diseño de un encauzamiento con flujo hiperconcentrado*. V Jornadas sobre encauzamientos fluviales, CEDEX, Madrid, (2000a).
- [2] Castillo, L., Santos, F., Ojeda, J., Calderón, P., Medina, J.M. *Importancia del muestreo y limitaciones de las formulaciones existentes en el cálculo del transporte de sedimentos*. XIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica. International Association for Hydraulic Engineering and Research, IAHR. Córdoba, Argentina, (2000b).
- [3] Castillo, L. *Estimation of sediment transport and dominant flow in hyperconcentrated flow*. The 6th International Conference on Hydroscience and Engineering (ICHE-2004). International Association of Hydraulic Engineering and Research IAHR, ASCE Environment and Water Resources Institute, The University of Mississippi. National Center for Computational Hydroscience and Engineering, CD ROM, Brisbane, Australia, June, (2004).
- [4] Castillo, L. *Discussion about Prediction of bed material discharge*. Journal of Hydraulic Research, Vol.45, No.2, pp. 425-428, (2007).
- [5] Danish Hydraulic Institute. *MIKE SHE*. User Manual, (2008).
- [6] Drobir Helmut. *Entwurf von Wasserfassungen im Hochgebirge*. Österreichische Wasserwirtschaft, Jahrgang 33, Heft 11/12, (1981).
Traducción: Castro Delgado M. *Diseño de captaciones en ríos de montaña*. POLITECNICA, Vol. VII. N° 1. Escuela Politécnica Nacional. Quito-Ecuador, (1982).
- [7] Martín Vide, J.P. *Ingeniería Fluvial*. Politex. Area d'Enginyeria Civil. Ed UPC. Barcelona. ISBN: 978-84-8301-900-9, (1997).
- [8] US Army Corps of Engineers. *Hydrologic Modeling System. HEC-HMS*. User's Manual. Version 3.3, (2008).
- [9] US Army Corps of Engineers. *Geospatial Hydrologic Modeling Extension. HEC-GeoHMS*. User's Manual. Version 1.1, (2003).
- [6] Wan, Z., Wang, Z. *Hyperconcentrated Flow*. I.A.I.R. Monograph Series, A.A. Balkema, Rotterdam, The Netherlands, (1994).

Evaluación de las acciones hidrodinámicas a pie de presa por efecto del desbordamiento por coronación

Francisco Javier Pérez de la Cruz, Luis G. Castillo Elstidic
 Grupo I+D+i Hidr@m - www.upct.es/hidrom/
 Ingeniería Hidráulica, Marítima y Medio Ambiental, UPCT
 Paseo Alfonso XIII, 52, 30203 Cartagena (Murcia)
 E-mail: fjpcruz@gmail.com, luis.castillo@upct.es

Resumen. En este artículo se presenta el tema de la tesis doctoral que en la actualidad está realizando el primer autor en el Laboratorio de Ingeniería Hidráulica de la Universidad Politécnica de Cartagena (UPCT), sobre las acciones hidrodinámicas que se producen en las presas de fábrica cuando se realiza un vertido por coronación. Esta tesis es continuación de la línea de investigación iniciada en la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC) y fruto de la cual ya se han leído tres tesis doctorales, así como de las posteriores investigaciones realizadas por el segundo autor y cuyos resultados se han publicado en diferentes congresos internacionales y revistas científicas.

1 Introducción

Una de las principales conclusiones de los estudios realizados sobre cambio climático es que en las zonas semiáridas los patrones de precipitación se concentrarán en menores intervalos temporales, lo que dará lugar a la presentación de tormentas más concentradas y destructivas, lo cual afectará al funcionamiento de las presas, su seguridad y a la disponibilidad del recurso con suficiente garantía.

En este contexto, las principales agencias de gestión del agua en Estados Unidos (Bureau of Reclamation, U.S. Army Corps of Engineers, etc.), vienen estudiando desde hace algunos años los efectos de los sucesos extremos en las presas y, más concretamente, el desbordamiento por coronación, con el objetivo final de lograr un adecuado refuerzo y evitar de esta manera su destrucción (Annandale, 2006).

Para la cuantificación de estas acciones, se utilizan algunas formulaciones obtenidas a partir de mediciones de presiones sistematizadas en laboratorios de hidráulica. En Europa se destacan las investigaciones llevadas a cabo en la Universidad de Glasgow (UK) (Ervine et al., 1997), la Escuela Politécnica Federal de Lausanne (Bollaert and Schleiss, 2003) y en las Universidades Politécnicas de Cataluña UPC y de Cartagena UPCT (Castillo, 1989, Armengou, 1991, Puertas, 1994, Castillo, 1998, 2006, 2007 y Castillo et. al., 2007).

En la actualidad, en España, existen unas 1200 grandes presas en explotación, con un volumen de regulación de unos 46000 Hm³/año, que han hecho posible pasar de una regulación natural de recursos inferior al 9%, a unos recursos disponibles superiores al 40% de las aportaciones medias anuales, lo que nos sitúa en el entorno de disponibilidades de la media de los países europeos. Resulta por tanto imprescindible continuar en España esta línea de investigación.

2 Caracterización del fenómeno

La disipación de la energía en el vertido por coronación de presas de fábrica se realiza principalmente mediante la disgregación del chorro (aireación y atomización), la difusión en el cuenco y, finalmente, el impacto con la base del cuenco de disipación (ver Fig. 1). Es por ello que, tanto las condiciones a la salida del aliviadero (condiciones de vertido), como las condiciones de impacto se han de tener en cuenta a la hora de realizar el diseño.

Las condiciones de vertido se definen mediante el valor de la velocidad media $V_i = (2gh_0)^{1/2}$, siendo h_0 aproximadamente el doble de la altura de energía h . Las condiciones de impacto (a la entrada del cuenco) vienen definidas por la velocidad media V_j y el ancho del chorro en el impacto $B_j = B_g + \xi$, siendo B_g el ancho por condiciones gravitatorias y ξ la distancia lateral de difusión por efectos de aireación y turbulencia (ver Fig. 2).

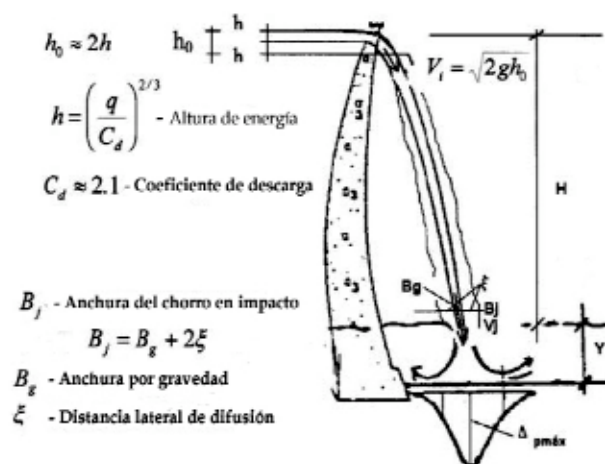


Figura 1. Vertido por coronación en una presa bóveda.

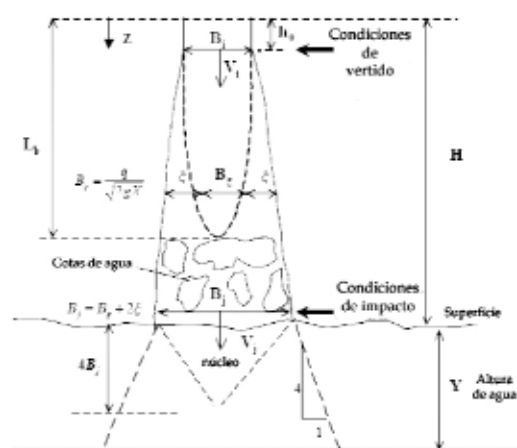


Figura 2. Esquema de comportamiento del chorro.

La longitud de rotura del chorro, L_b , es un parámetro muy importante. Cuando se supera esta distancia, el chorro está completamente desarrollado o desintegrado, desapareciendo el núcleo sólido y conteniendo únicamente grandes gotas de agua que a medida que siguen cayendo, se descomponen en gotas más y más pequeñas debido al rozamiento con el aire. Una vez que el chorro alcanza la superficie de agua del cuenco de disipación, se inicia el proceso de difusión, produciéndose la desintegración de la parte sólida del chorro a una profundidad de 4 veces el ancho del chorro en la zona de incidencia o de impacto B_j .

3 Registros de presiones

Los estudios realizados por Castillo (1989) y Puertas (1994) sobre las presiones instantáneas producidas en el cuenco son el punto de partida de la investigación a desarrollar en esta tesis. Las diferentes configuraciones del chorro estudiadas se muestran en la Fig. 3.

Según las conclusiones de Castillo (2007), en el caso de chorros sin desarrollar con colchones de agua poco profundos (Fig. 3. Caso a) los registros muestran un patrón constante con picos de presiones similares por encima y por debajo de la media, que disminuyen a medida que aumenta el colchón de agua en el cuenco. Es en este caso cuando la función de densidad de los registros de presiones se ajusta a una distribución normal.

En el caso de chorros desarrollados se registran presiones más fluctuantes, fenómeno que aumenta con la altura de caída y el colchón de agua.

4 Parámetros de cálculo

Del estudio de las presiones en el cuenco, se han definido diferentes parámetros de cálculo que se comentan a continuación (Castillo, 1998, 2006, Castillo et al., 2007).

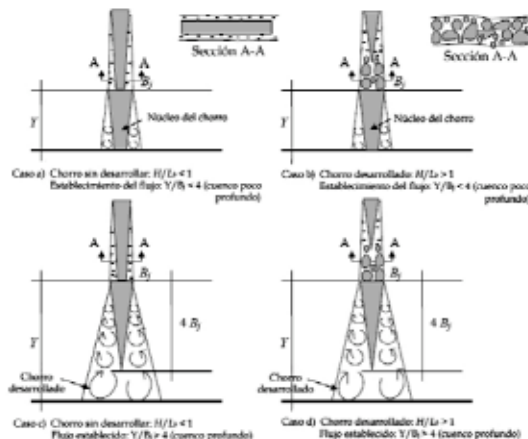


Figura 3. Esquemas de las diferentes configuraciones de chorro.

4.1 Intensidad de la turbulencia en condiciones de vertido (T_u^*) y longitud de rotura del chorro (L_b)

Se toman como punto de partida de las formulaciones que se proponen para estimar los dos parámetros de cálculo, la ecuación experimental de longitud de rotura del chorro circular de Ervine et al. (1997) y la de chorro rectangular de Horení (1956), resultando

$$T_u^* = q^{0.43} / IC \quad (1)$$

siendo q el caudal específico e IC las condiciones iniciales del vertido:

$$IC = \frac{14.95g^{0.50}}{K^{1.22}C_d^{0.19}} \quad (2)$$

donde el coeficiente de descarga $C_d \approx 2.1$ para el caso usual de un aliviadero hidrodinámico y $K \approx 0.85$.

La longitud de rotura del chorro se estima con:

$$\frac{L_b}{B_j F_i^2} = \frac{0.85}{(1.07 T_u F_i^2)^{0.82}} \quad (3)$$

donde B_j y F_i son la anchura del chorro y el número de Froude en condiciones de vertido y, T_u es la intensidad inicial de la turbulencia correspondiente y que está comprendida entre 0 y 3%.

4.2 Anchura del chorro en condiciones de impacto (B_j)

Como ya se indicó, la anchura del chorro en condiciones de impacto viene dada por la expresión:

$$B_j = B_o + 2\zeta \quad (4)$$

Según Ervine et al. (1997):

$$\xi = kv't = k \left(\frac{v'}{V_i} \right) V_i \frac{V_j - V_i}{g} \quad (5)$$

Partiendo de esta ecuación se define un nuevo parámetro de turbulencia $\phi = k(v'/V_i)$, siendo k el coeficiente de la distancia lateral de difusión, t es el tiempo caída del chorro y v' la componente de la turbulencia en la dirección principal del flujo. V_i y V_j son las velocidades medias en condiciones de vertido e impacto respectivamente.

Sustituyendo en la ecuación (5) las velocidades medias correspondientes, se obtiene que

$$\xi = 2\phi\sqrt{h_0}[\sqrt{H} - \sqrt{h_0}] \quad (6)$$

siendo H la diferencia entre los niveles de agua en el vertido y en el cuenco y $\phi = 1.07T_u$ (Castillo 2006).

La expresión de la anchura del chorro en condiciones de impacto queda de la siguiente forma:

$$B_j = \frac{q}{\sqrt{2gH}} + 4\phi\sqrt{h_0}[\sqrt{H} - \sqrt{h_0}] \quad (7)$$

4.3 Coeficientes de presión dinámica media (C_p) y fluctuante (C'_p)

Castillo (1998) realizó un nuevo análisis con los datos existentes a la fecha y propuso formulaciones del coeficiente de presión dinámica media $C_p = f(Y/B_j, H/L_b)$. En la Fig. 4 se presentan los resultados obtenidos comparándolos con los de otros autores (chorros circulares y rectangulares).

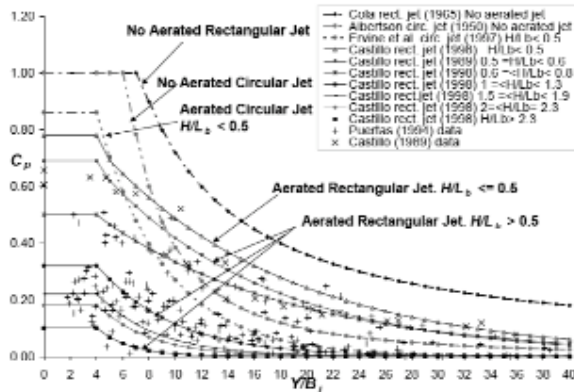


Figura 4. Coeficientes de presión dinámica media C_p .

Se puede observar que para $H/L_b \leq 0.5$, resulta una única curva de cálculo. Sin embargo para $H/L_b > 0.5$ se obtiene una familia de curvas en función de éste parámetro.

Se comprueba de la Figura anterior que la desintegración de la fase sólida del chorro se produce

a una profundidad aproximada de cuatro veces la anchura de impacto ($Y < 4B_j$). Para este rango el colchón de agua del cuenco es ineficaz (no se produce disipación de energía por difusión) y se obtiene el coeficiente de presión dinámica media en la solera del cuenco C_p y, la correspondiente disipación de energía del chorro en el aire y por el arrastre del mismo dentro del cuenco DE_{air} :

$$C_p = 0.36(H/L_b)^{-1.04} \quad (8)$$

$$DE_{air} = 1 - 0.36(H/L_b)^{-1.04} \quad (9)$$

Para valores de $H/L_b > 0.5$, se propone la siguiente ley exponencial:

$$C_p = \frac{H_m - Y}{V_j^2 / 2g} = ae^{b(Y/B_j)} \quad (10)$$

siendo H_m la carga media e Y la profundidad de agua en el cuenco. Los valores de a y b , así como el valor de C_p , vienen reflejados en la siguiente tabla:

H/L_b	a	b	C_p ($Y/B_j \leq 4$)
< 0.5	0.98	0.070	0.78
0.5-0.6	0.92	0.079	0.69
0.6-0.8	0.65	0.067	0.50
1.0-1.3	0.65	0.174	0.32
1.5-1.9	0.55	0.225	0.22
2.0-2.3	0.50	0.250	0.18
> 2.3	0.50	0.400	0.10

Tabla 1. Parámetros a y b para el cálculo de C_p .

Las fluctuaciones de presión de la raíz cuadrática media se definen como $C'_p = H'/(V_j^2/2g)$ donde H' es el valor de la raíz cuadrática media de las fluctuaciones de la carga de presión.

La Fig. 5 muestra los resultados para diferentes intensidades de la turbulencia, T_u (Bollaert 2002, chorro circular) y del parámetro H/L_b (Castillo 2006, vertido libre o chorro rectangular).

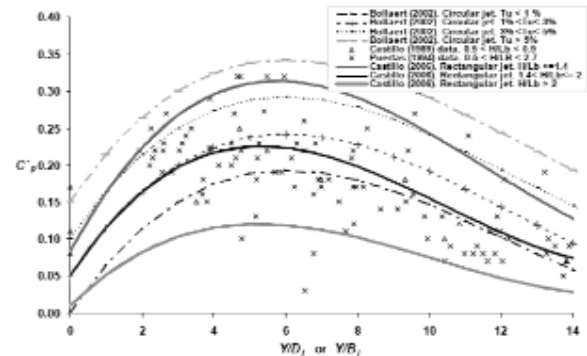


Figura 5. Coeficientes de presión dinámica fluctuante C'_p .

4.4 Coeficientes de presión dinámica extrema (C_p^+ y C_p^-).

Las Fig. 6 y 7 muestran los valores de los coeficientes de presión dinámica extrema positiva (C_p^+) y negativa (C_p^-).

$$C_p^+ = \frac{P_{\max} - H_m}{V_j^2 / 2g} \quad (10)$$

$$C_p^- = \frac{H_m - P_{\min}}{V_j^2 / 2g} \quad (11)$$

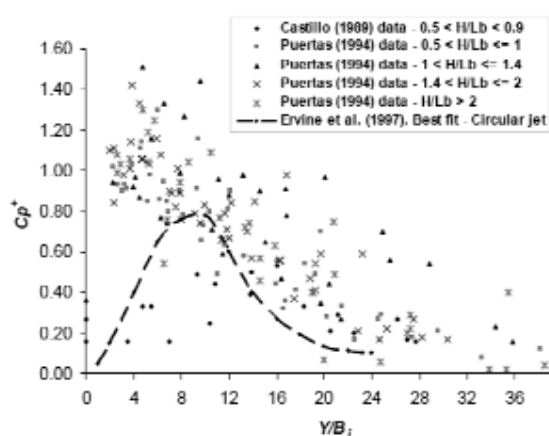


Figura 6. Coeficientes de presión dinámica extrema positiva C_p^+ .

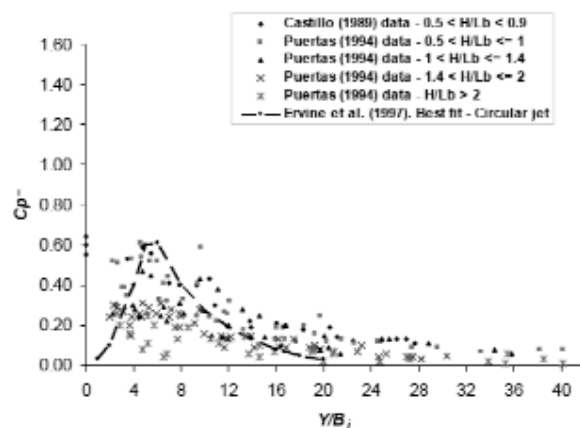


Figura 7. Coeficientes de presión dinámica extrema negativa C_p^- .

Los valores obtenidos no permiten realizar ningún tipo de ajuste.

Los valores extremos positivos medidos son muy superiores a los datos que se pueden encontrar en la literatura existente (Ervine et al. 1997 and Bollaert et al. 2003). El valor máximo obtenido es de $C_p^+ \sim 1.3$ para la relación $Y/B_j = 8$.

Los valores extremos negativos se ajustan más a los datos ya publicados, obteniéndose un valor máximo de $C_p^- \sim 0.6$ para la relación $Y/B_j = 6$.

Todas las formulaciones recogidas en este epígrafe 4 y sus diferentes actualizaciones y modificaciones se han venido publicando en diferentes congresos internacionales y revistas científicas (Castillo et al., 2007; Castillo, 2007; Castillo, 2006; Castillo, 2002; Castillo et al., 1999; Annandale, 2006; Bollaert et al., 2003; Ervine et al., 1997; Hager et al., 2007). Puesto que la metodología de cálculo se basa exclusivamente en el resultado de las mediciones de presiones instantáneas en el fondo del cuenco, consideramos necesario, para avanzar en el conocimiento de esta temática, realizar más estudios experimentales, tanto en modelos físicos como en prototipos, caracterizando simultáneamente presiones, velocidades y las diferentes tasas de aireación.

5 Adquisición de datos

Con este fin se ha construido en el Laboratorio de Ingeniería Hidráulica de la UPCT una infraestructura destinada a la toma de datos de las diferentes variables.

5.1 Descripción de la infraestructura

La infraestructura para el estudio de chorros turbulentos y disipación de energía que permitirá estudiar fenómenos bifásicos (agua-aire) (aireación-atomización, difusión e impacto) consta de un dispositivo móvil que permite obtener alturas de vertido de entre 1,70 y 4 m con unos caudales entre 30 y 150 l/s, un cuenco fijo de disipación de energía de metacrilato donde se realizarán medidas de presión, velocidad y aireación y, un canal de desagüe donde se dispone un aforador triangular (ver Fig. 8).

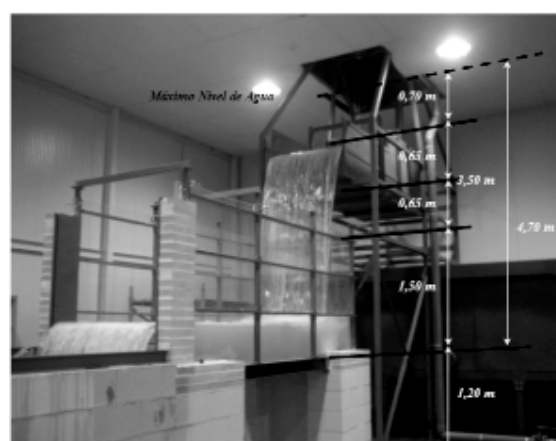


Figura 8. Infraestructura para el estudio de chorros turbulentos.

5.2 Instrumentación

Para realizar las mediciones se cuenta con la siguiente instrumentación:

- 1) Medidores de velocidades instantáneas (acoustic Doppler velocimeters, ADV).
- 2) Transductores de presiones instantáneas piezoeléctricos.

- 3) Equipos de fotografía y vídeo de alta velocidad.
- 4) Equipo de fibra óptica para la medición de concentración de aire, velocidad de aire y distribución de tamaños de burbujas.

Todos estos elementos de medida cuentan con una serie de dispositivos electromecánicos que permiten automatizar los diferentes procesos de medida.

6 Conclusiones

Con el fin de mejorar el diseño de estructuras de disipación de energía en presas de fábrica y adaptarlas a los nuevos condicionantes de seguridad de presas y los diversos requerimientos medioambientales, es necesario avanzar en el conocimiento y caracterización de las acciones hidrodinámicas que se presentan en las mismas.

A los estudios ya realizados sobre medidas de presiones en el cuenco, se han de añadir investigaciones relacionadas con los fenómenos de aireación producidos en el chorro, así como medidas de velocidades en el cuenco de disipación.

Este es el objetivo de la tesis doctoral que está llevando a cabo el primer autor, cuyos resultados y conclusiones contribuirán a avanzar en el conocimiento de estos fenómenos.

Agradecimientos

Al Prof. Dr. Jerónimo Puertas (Universidad de La Coruña, UDC) y al Prof. Dr. José Dolz (Universidad Politécnica de Cataluña, UPC) por los datos experimentales facilitados.

Parte de este Proyecto de investigación ha sido financiado por el Ministerio de Ciencia y Tecnología de España y por los Fondos Europeos de Desarrollo Regional (FEDER), a través del Proyecto BIA2003-08635-C03-03.

Referencias

- [1] Annandale, G.W. *Scour Technology. Mechanics and Engineering Practice*. McGraw-Hill, New York, USA, 2006.
- [2] Bollaert, E., Schleiss, A. *Scour of rock due to the impact of plunging high velocity jets Part I: A state-of-the-art review*. Journal of Hydraulic Research, Vol. 41, No.5, pp. 451-464, 2003.
- [3] Castillo, L. *Revisión de las formulaciones de presión en los disipadores de energía en presas bóveda y corrección del coeficiente de presión*

dinámica. Comunicación personal. No publicado, 1998.

- [4] Castillo, L. *Parametric analysis of the ultimate scour and mean dynamic pressures at plunge pools*. Proceedings of the International Workshop on Rock Scour due to Falling High-velocity Jets. École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Switzerland, 25-28 september 2002. Schleiss & Bollaert (eds). A.A. Balkema. ISBN 90 5809 518 5, 2002.
- [5] Castillo, L. *Aerated jets and pressure fluctuation in plunge pools*. The 7th International Conference on Hydrosience and Engineering (ICHE-2006), IAHR, ASCE Environment and Water Resources Institute, Drexel University. College of Engineering. DSpace Digital Library. DU Haggerty Library (22 pages). Philadelphia, USA, 2006.
- [6] Castillo, L. *Pressure characterization of undeveloped and developed jets in shallow and deep pool*. 32nd Congress of IAHR, the International Association of Hydraulic Engineering & Research, Vol.2, pp. 645-655, Venice, Italy, July. 2007.
- [7] Castillo, L., Puertas, J., Dolz, J. *Discussion about pressure fluctuations on plunge pool floors*. Journal of Hydraulic Research, Vol.37, No.2, pp. 272-288, 1999.
- [8] Castillo, L.; Puertas, J. and Dolz, J. *Discussion about Scour of Rock due to the impact of plunging high velocity jets*. Journal of Hydraulic Research, Vol. 45, No. 6, pp. 715-723, 2007.
- [9] CEDEX. *Estudio sobre el impacto potencial del cambio climático sobre recursos hídricos y demandas de agua de riego en determinadas regiones de España*. Informe para MMA, 1997.
- [10] Irvine, D.A., Falvey, H.T., Withers, W.A. *Pressure fluctuations on plunge pool floors*. Journal of Hydraulic Research. Vol. 35, No. 2, pp. 257-279, 1997.
- [11] Hager, W.H., Unger, J. *Book Review: Scour Technology*. By George W. Annandale. McGraw-Hill, New York, USA. Journal of Hydraulic Research, Vol. 45, No. 5, pp. 719-720, 2007.

Efecto de tratamientos isotérmicos sobre la supervivencia de *Listeria monocytogenes* evaluada in vitro.

J.P. Huertas-Baquero¹, L. Guevara-Prieto¹, P.S. Fernández-Escámez¹, A. Palop^{1*}

¹ Laboratorio de Microbiología de Alimentos, Departamento de ingeniería de alimentos y del equipamiento agrícola, Escuela Técnica superior de ingeniería agrónoma, Universidad Politécnica de Cartagena. Paseo Alfonso XIII, 48. 30203 Cartagena, España

*alfredo.palop@upct.es

Resumen: Uno de los principales patógenos de interés en la industria alimentaria es *Listeria monocytogenes* causante de la listeriosis, la cual presenta una alta incidencia en humanos debido a que se encuentra asociada al consumo de alimentos contaminados con el microorganismo, debido a su presencia en gran cantidad de productos. El objetivo de esta investigación fue evaluar el efecto de los tratamientos isotérmicos, para el control de *L.monocytogenes*. Para poder determinar el efecto de estos tratamientos se aplicaron tratamientos isotérmicos a 55°C y 60°C, sobre la cepa *L.monocytogenes* CETC 4032. Después de cada tratamiento se recuperó el microorganismo en un medio no selectivo y en uno selectivo, obteniéndose una mayor reducción en la población en el medio de recuperación con un factor de inhibición.

1. INTRODUCCIÓN

Uno de los principales patógenos de interés en la industria alimentaria es *Listeria monocytogenes* causante de la listeriosis. La mayor incidencia de esta enfermedad en humanos está asociada al consumo de alimentos contaminados con el microorganismo debido a su presencia en gran cantidad de productos, y a su capacidad de crecimiento y supervivencia a distintos tratamientos y en diversas condiciones de almacenamiento.

De acuerdo con los datos de la organización mundial de la salud, la listeriosis es la enfermedad alimentaria con la segunda tasa más alta de mortalidad, con un porcentaje de mortalidad de entre el 20% y el 30%, y con la mayor tasa de hospitalización (95.5% Low, *et.al.*, 1997).

El objetivo de esta investigación fue evaluar el efecto de los tratamientos térmicos, y las condiciones de recuperación en la inactivación de *Listeria monocytogenes*.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Microorganismo y crecimiento: Se utilizó la cepa de *Listeria monocytogenes* CETC 4032, procedente de la Colección española de cultivos de tipo CECT (Valencia, España), la cual se incubó en caldo infusión cerebro corazón (B.H.I) (Scharlau, Barcelona, España) por 24 horas a 37°C. La cepa fue conservada a -80°C en 30% de glicerol como crioprotector.

2.2 Preparación de la suspensión para el termorresistómetro: A partir de un cultivo en BHI se inocularon 100µL en 50 mL de caldo BHI estéril y se incubó durante 24 horas a 37°C. Una vez incubado el cultivo se centrifugó a 3500 rpm durante 20 minutos a 5°C. El depósito se resuspendió en 1 mL de agua peptonada estéril

(Scharlau). De esta última suspensión se realizaron diluciones seriadas en base 10, las cuales se sembraron en agar infusión cerebro corazón (B.H.I.A) (Scharlau) y se incubaron a 37°C por 24 horas, para determinar la concentración del inóculo.

2.3 Realización de los tratamientos térmicos a 55°C y 60°C: El termorresistómetro (T.R) usado fue el T.R Mastia patente española 200302529. Para cada tratamiento se adicionaron 350 mL de caldo B.H.I al T.R el cual se esterilizó en el mismo a 135°C y 2atm por 5 minutos.

2.3.1 Tratamientos isotérmicos: Se programó el T.R. para que estabilizará la temperatura de acuerdo al tratamiento. Cuando la temperatura se estabilizó se inyectó la suspensión en el termorresistómetro. Los tratamientos tuvieron una duración de 30 minutos a 55°C y de 5 minutos a 60°C y las muestras se tomaron en diferentes intervalos de tiempo durante la aplicación de los tratamientos. Cada tratamiento se realizó por triplicado.

2.7 Análisis de los datos experimentales: A los datos obtenidos se les realizó un ANOVA utilizando el software estadístico Statgraphics para establecer que no existía diferencias significativas entre las diferentes combinaciones probadas y sus replicas. Las curvas obtenidas en los diferentes tratamientos, se generaron graficando el Log de los supervivientes contra el tiempo de tratamiento.

Las curvas de supervivencia obtenidas en los diferentes tratamientos se obtuvieron representando el logaritmo de los supervivientes frente al tiempo de tratamiento. A partir de las gráficas de supervivencia se calcularon los valores D, como el tiempo necesario para reducir el número de supervivientes un ciclo logarítmico.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos que se presentarán y discutirán a continuación se les una prueba de ANOVA, utilizando el software estadístico Statgraphics, obteniéndose como resultado que no existieron diferencias estadísticamente significativas ($p > 0,05$) entre las replicas de los tratamientos aplicados.

Como puede observarse en la tabla 1, en el medio BHIA se obtuvo un $D_{55} = 23,19$ min, conllevando a deducir que el microorganismo posee una alta termorresistencia a esta temperatura.

En comparación, en el medio de recuperación selectivo se obtuvo un $D_{55NaCl} = 7,30$ min, indicando que se necesita mucho menos tiempo para disminuir la población en un ciclo logarítmico, si tras el tratamiento el microorganismo es incubado en un medio con un factor de inhibición adicional como el cloruro de sodio, en estas condiciones la población disminuye 4 unidades en 30 minutos de tratamiento, como se puede observar en la figura 1. La población se reduce 4 ciclos logarítmicos más que el control debido a los daños sub-letales por el tratamiento térmico aplicado, debido a que en el medio selectivo solo crece la mitad de la población inoculada y que de la del medio no selectivo, sugiriendo esto que el daño causado a la población es a nivel de factores vitales de crecimiento y de recuperación, pudiendo ser estos enzimas o proteínas. Los resultados anteriores se asemejan a los obtenidos por Miller, *et al.*, 2006, en su investigación, en la cual determinó que el D_{55} para *Listeria innocua* en un medio selectivo es de 10,66 minutos con un R^2 de 0,97 corroborándose así uno de los principios de la teoría probabilística el cual postula que “en un cultivo puro existe una heterogeneidad entre las células” (Van Boekel, 2002).

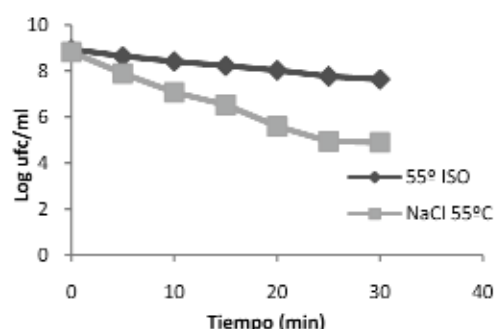


Figura 1. Supervivencia de *L.monocytogenes* CETC 4032 en condiciones isotérmicas (55°C) en medio de recuperación BHIA y BHIA+NaCl.

El tratamiento a 60°C presenta resultados muy diferentes a los de 55°C, siendo este tratamiento mucho más efectivo en la destrucción del microorganismo. Como puede observarse en la tabla 2, los valores D estimados indican que el microorganismo es termosensible a este tratamiento y como se puede observar en la figura 2 tras 5

minutos de tratamiento se disminuye casi el 90% de la población. Cabe resaltar que la población de *L.monocytogenes* CETC 4032 disminuye 1 unidad logarítmica durante el contacto del microorganismo con el medio, sugiriendo que el daño letal producido pudo haber sido sobre componentes celulares vitales. Estos valores no se asemejan a los obtenidos por Miller, *et al.*, 2006, en su investigación con *Listeria innocua* donde obtuvo un D_{60} de 2,73 en un medio no selectivo y de 1,08 en un medio, apuntando esto a que posiblemente *L.monocytogenes* es menos termorresistente que *L.innocua* en un tratamiento isotérmico a 60°C.

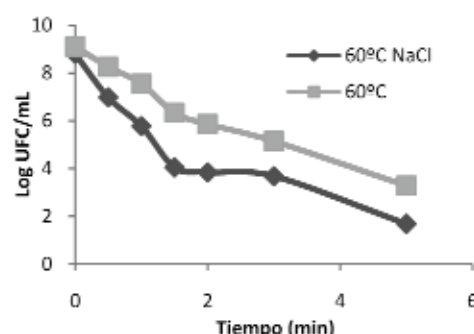


Figura 2. Supervivencia de *L.monocytogenes* CETC 4032 en condiciones isotérmicas (60°C) en medio de recuperación BHIA y BHIA+NaCl.

Tabla 1. Valores D y z estimados de *L.monocytogenes* CETC 4032 en tratamientos isotérmicos.

Temperatura (°C)	No selectivo		Selectivo	
	BHIA		BHIA+NaCl	
	D(min) ^a	R ²	D(min) ^a	R ²
55	23,1931	0,993	7,3044	0,958
60	0,87688	0,973	0,7831	0,834
z (°C)	3,51515		5,15597	

^a Media de tres réplicas.

Tras 5 min a 60°C muere el 99,99% de la población, si se siembra sin NaCl y el 99,9999% de la población si se siembra con NaCl.

4. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en la aplicación de tratamientos isotérmicos sugieren que un tratamiento a 55°C es efectivo en la termodestrucción de *L.monocytogenes* CETC 4032, pero si es combinado con otros factores de inhibición de crecimiento tales como NaCl al medio de recuperación, el tratamiento es más efectivo, produciendo una reducción significativa en el valor D y el tiempo de tratamiento, siendo muy interesante su evaluación en un alimento. Caso contrario para 60°C donde la reducción es del 50% sin la combinación de otro factor de inhibición y del 90% en combinación, siendo el tratamiento propicio para ser evaluado en un alimento y observar el comportamiento del microorganismo.

10. Bibliografía

- [1] Conesa, R., Periago, P., Esnoz, A., López, A., Palop, A. 2003. Prediction of *Bacillus subtilis* spore survival after a combined non-isothermal-isothermal heat treatment. Eur food res technol 217, 319-324.
- [2] Cunha, L., Oliveira, F., Brandão, T., Oliveira, J. 1997. Optimal experimental design for estimating the kinetic parameters of the bigelow model. Journal of food engineering 33, 111-128.
- [3] Doyle, M., Mazzotta, A.S., Wang, T., Wiseman, D.W., Scott, V.N. 2001. Review: Heat Resistance of *Listeria monocytogenes*. Journal of Food Protection, Vol. 64, No. 3, 2001,410-429.
- [4] Doyle, M.1999. Literature survey of the various techniques used in *Listeria* intervention. Food research institute. Version online <http://www.wisc.edu/fri/bries.html>.
- [5] Lin, Y., Chou, C. 2003. Effect of heat shock on thermal tolerance and susceptibility of *Listeria monocytogenes* to other environmental stresses. Food Microbiology 21 605-610.
- [6] Low, J. C., Donachie, W. 1997. A Review of *Listeria monocytogenes* and Listeriosis. *The Veterinarian Journal* 153, 9-29.
- [7] Mena, C., Almeida, G., Carneiro, L., Teixeira, P., Hogg, T., Gibbs, Paul A. 2003. Incidence of *Listeria monocytogenes* in different food products commercialized in Portugal. Food Microbiology 21, 213-216.
- [8] Miller, F.A., Brandão, T.R.S., Teixeira, P., Silva, C.L.M. 2006. Recovery of heat-injured *Listeria innocua*. International Journal of Food Microbiology 112, 261-265.
- [9] Peleg, M. 1999. On calculating sterility in thermal and non-thermal preservation methods. Food research international 32, 271-278.
- [11] Peleg, M., Pechina, C.M., Cole, M.B. 2001 A. Estimation of the survival curve of *Listeria monocytogenes* during non-isothermal heat treatments. Food research international 34, 383-388.
- [12] Periago, P.M., Conesa, R., Delgado, B., Fernández, P.S., Palop, A.2006. *Bacillus megaterium* spore germination and growth inhibition by a treatment combining heat with natural antimicrobials. Food technol. Biotechnol. 44(1), 17-23.
- [13] Periago, P.M., Delgado, B., Fernández, P.S., Palop, A.2004. Use of carvacrol and cymene to control growth and viability of *Listeria monocytogenes* cells and predictions of survivors using frequency distribution functions. Journal of food protection vol.67 No7, 1408-1416.
- [14] Stumbo, C.R. 1973. Thermobacteriology in food processing. Segunda edición. Ed. Academic press. New York and London. Páginas 130-133.
- [15] Van Boekel, Martinus a.j.s. 2002. On the use of the Weibull model to describe thermal inactivation of microbial vegetative cells. International journal of food microbiology 74, 139-159.

Cuantificación de parámetros cinéticos de polímeros conductores: poli-3, 4-etilendioxitiofeno (PEDOT).

M. Caballero Romero, T. F. Otero.

Centro de Electroquímica y Materiales Inteligentes (CEMI). Universidad Politécnica de Cartagena (UPCT).

Paseo Alfonso XIII, 48. 30203 Cartagena (Murcia)

Teléfono: 968 32 5591 Fax: 968 32 5931

E-mail: maria.caballero@upct.es

Resumen. Las líneas de trabajo del grupo de investigación, que desarrolla síntesis, propiedades y aplicaciones electroquímicas de polímeros conductores son: ventanas electrocrómicas, músculos artificiales, membranas inteligentes e interfaces nerviosas. Los materiales poliméricos conductores se sintetizan electroquímicamente a partir de diferentes monómeros como son pirrol, tiofenos y sus derivados y anilinas. A partir de estudios cinéticos de éstos materiales, pueden cuantificarse los parámetros cinéticos empíricos que definen las reacciones químicas de oxidación-reducción.

1 Introducción

Durante los últimos años se desarrollan varias líneas de investigación en nuestro grupo, como son membranas inteligentes, músculos artificiales y ventanas electrocrómicas, entre otros. Para ello se sintetizan polímeros conductores cuyas propiedades permiten el desarrollo de estas aplicaciones, como son: polipirrol (PPY), polianilina (PANI), politiofeno (PTHY), poli-3,4-etilendioxitiofeno (PEDOT) y poli-3-metiltiofeno (P-3-MTHY). La estructura de los polímeros está basada en dobles enlaces conjugados de cadenas de carbono, la formación de cadenas poliméricas y la deslocalización electrónica favorecen la conducción electrónica a través de estos materiales (Figura 1).

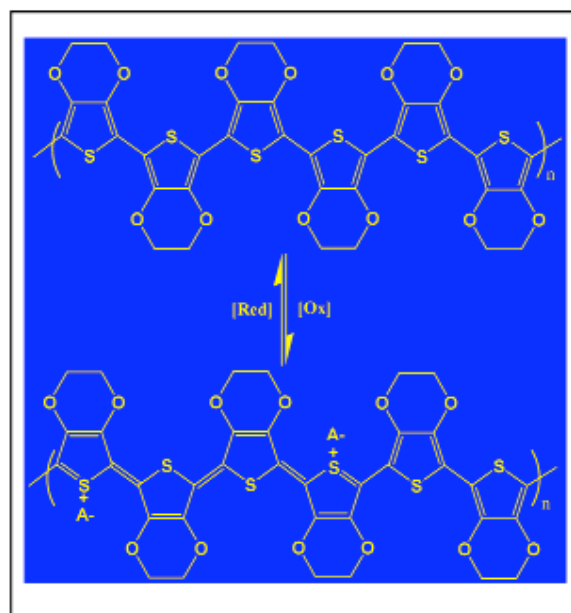
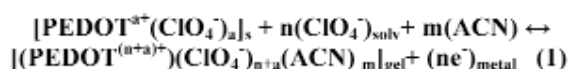


Figura 1. Estructura de PEDOT, polímero conductor y derivado tiofénico.

Los polímeros conductores son de gran importancia en la construcción de dispositivos electroquímicos. Algunas propiedades de estos materiales son

químicas: reacción química redox e intercambio iónico, otras, consecuencia de las anteriores son físicas: cambios de volumen y de color, de carga almacenada o de porosidad. La mayor parte de las aplicaciones se basan en estas propiedades y en su cambio controlado durante la reacción.

La reacción redox general planteada para el PEDOT, parcialmente oxidado, en disolución de acetonitrilo con LiClO_4 0.1 M, es la siguiente:



La reacción se inicia mediante aplicación de una serie de perturbaciones eléctricas a los materiales, como aplicar un sobrepotencial a la película de polímero conductor. Estas experiencias están basadas en estudios realizados anteriormente y teniendo en cuenta el modelo de Relajación Conformacional^{1,2}. A partir de la reacción planteada (1) se establece la ecuación cinética empírica y se propone el método experimental con el que se obtienen parámetros cinéticos cuantitativos:

$$R = i = dQ/dt = k [\text{ClO}_4]^\alpha [\text{AC}]^\beta \quad (2)$$

Tomando logaritmos se tiene la siguiente ecuación: $\log i = \log k + \alpha \log [\text{ClO}_4] + \beta \log [\text{CA}]$ (3). Esta ecuación incluye tres variables experimentales: concentración de electrolito, temperatura de la celda ($k = A \exp(-E_a/RT)$, donde E_a es la energía de activación de la reacción (1)) y los estudios cinéticos se pueden repetir para distintos potenciales catódicos de prepolarización.

2 Experimental

El disolvente acetonitrilo (ACN) (Lab Scan) y la sal perclorato de litio (LiClO_4) (Fluka) de alta pureza se usaron sin ningún tratamiento, sin embargo el

monómero 3,4- etilendioxitiofeno (Merck) se destiló a vacío antes de ser usado. El electrodo de trabajo fue una hoja de Pt de 1 cm^2 de área superficial, los contraelectrodos dos hojas de acero de 3.75 cm^2 de área superficial y un Ag/AgCl (3M Cl Crison Instruments) se usó como referencia. La celda electroquímica constaba de un solo compartimento y los experimentos se desarrollaron en atmósfera de nitrógeno y a temperatura ambiente. Las técnicas electroquímicas fueron implementadas por un potenciostato-galvanostato (Eco Chemistry Autolab).

Las películas de PEDOT se generaron electroquímicamente en una disolución de LiClO_4 0.1 M y 10 mM de 3, 4- etilendioxitiofeno en acetonitrilo como disolvente. Fueron obtenidas por cronopotenciometría y a densidad de corriente constante (2 mA/cm^2) a través del electrodo de Pt durante un tiempo constante de 150 s., consumiéndose una carga constante de 300mC. La evolución del potencial se siguió frente a Ag/AgCl. Después de cada polimerización las películas obtenidas fueron lavadas con acetonitrilo, para eliminar los restos de monómero, y secadas antes de ser usadas. El peso de cada película se obtuvo en una balanza de precisión de 10^{-7} g (Sartorius SC2).

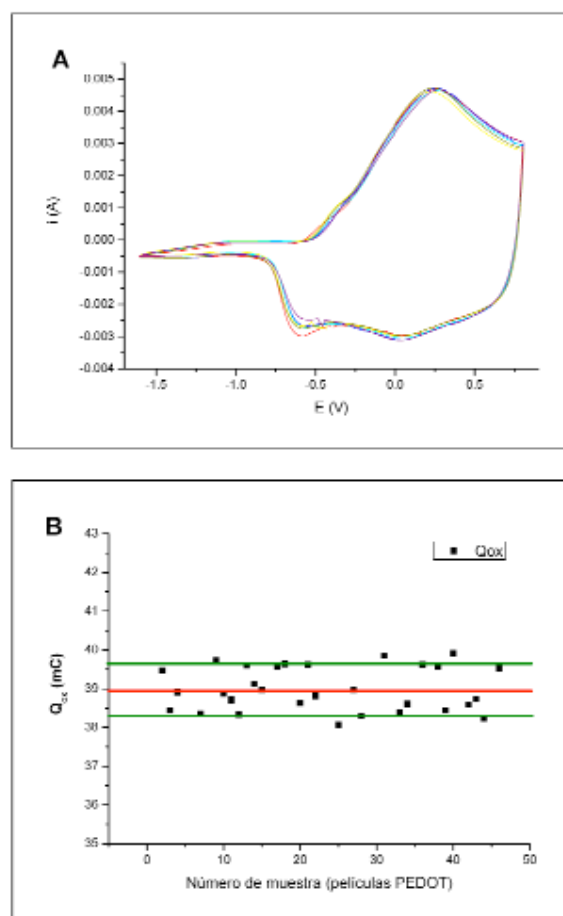


Fig.2. A. Voltametrías cíclicas de control de películas de PEDOT recién sintetizadas. B. Desviación estándar de la carga de oxidación media obtenida por voltametría cíclica de control de las películas al ser sintetizadas (alrededor de 30 películas distintas) Cada una de ellas fue electrosintetizada en 0.1M LiClO_4 y 10 mM 3, 4-etilendioxitiofeno, en ambas soluciones se usó acetonitrilo como disolvente. Fueron electrogeneradas por el paso de

300 mC cm^{-2} a través de un electrodo de trabajo de Pt y a un potencial constante de 1200 mV respecto al electrodo de referencia Ag/AgCl.

Cada una de las películas fue controlada por voltametría cíclica en acetonitrilo con LiClO_4 0.1 M, entre límites de potencial constante (figura 2A). Ello permite conocer la carga total almacenada en la película antes y después de cada serie experimental (consistiendo una serie experimental en varios saltos de potencial desde diferentes potenciales catódicos, durante 30 segundos, a un mismo potencial anódico). Cuando la carga disminuía cerca de un 10% de la observada en la película recién sintetizada, una nueva película se obtenía y se chequeaba para someterla al estudio cinético.

3 Resultados

Como consecuencia de establecer distintos potenciales catódicos de prepolarización durante 30s. sobre las películas y registrar las experiencias con una técnica electroanalítica, se obtienen cronoamperogramas. De ellos se extraen los datos, de los máximos cronoamperométricos (intensidad y tiempo) y de integrar el área bajo la curva (carga Q del salto de potencial catódico a distintos potenciales anódicos). El tratamiento de datos permite el cálculo de los parámetros cinéticos. Pueden verse en la tabla 1, los potenciales de prepolarización catódicos usados, así como los distintos parámetros cuantificables a partir de las experiencias: la ordenada en el origen de las rectas (R_0) que se obtienen para un rango de potenciales anódicos elegido, la pendiente (β) de las mismas y la constante de velocidad (k). Todos ellos son obtenidos a partir de las representaciones gráficas de las rectas semilogarítmicas y doblemente logarítmicas³, que el tratamiento de datos genera considerando la ecuación (3).

E_{cat} (mV)	R_0 ($\text{mol L}^{-1}\text{s}^{-1}$)	β	k ($\text{mol L}^{-1}\text{s}^{-1}$)
-200	0.0922	0.86	3.91
-400	0.0940	1.10	3.93
-600	-0.0452	1.40	3.90
-800	-0.0420	1.41	3.83
-1000	-0.0595	1.37	2.86
-1100	-0.0940	1.44	2.55
-1200	-0.1589	1.54	2.19
-1400	-0.2844	1.80	1.64
-1600	-0.4019	1.88	1.25
-1800	-0.4444	2.01	1.14
-2000	-0.4751	2.09	1.06
-2200	-0.4849	2.14	1.04

Tabla 1. R_0 es la ordenada en el origen, β es la pendiente de la recta y el orden de reacción respecto del potencial catódico y k es el coeficiente de velocidad para diferentes condiciones de prepolarización iniciales sobre la película. El coeficiente de velocidad k , fue obtenido de la ecuación (3).

Como se observa en esta tabla, hay un determinado potencial, entorno a -0.8V al que k deja de ser constante como sería de esperar para esta magnitud. Este potencial catódico se denomina potencial de cierre de la estructura (F_s) y es a partir del cual la estructura se cierra y compacta con la reducción. Así la siguiente oxidación ocurre con menor velocidad debido a este cierre de la estructura, los valores de k disminuyen para mayores potenciales catódicos de polarización inicial, debido a la reducción y compactación de la estructura.

Al variar la concentración de electrolito LiClO_4 (0.05, 0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 y 1M) en acetonitrilo como disolvente, se obtuvieron distintas cinéticas a partir de la ecuación (3) para los diferentes potenciales catódicos de pretratamiento. De las pendientes de éstas se obtuvieron los valores de α , indicado en las ecuaciones (2) y (3) y que son reflejados en la Tabla 2, junto con las ordenadas de las rectas y las concentraciones de centros activos ($[\text{PEDOT}^*]$, siendo el cálculo del número de lugares activos o zonas susceptibles de almacenar carga positiva, en las cadenas de polímero conductor y que participan en la reacción química para cada salto de potencial aplicado).

$E_{\text{cat}} = -1000\text{mV}$			
$E_{\text{ox}} (\text{mV})$	$R_0 (\text{mol L}^{-1}\text{s}^{-1})$	α	$[\text{PEDOT}^*] (\text{mol e}^- \text{L}^{-1})$
200	1.28	0.39	0.93
400	1.46	0.32	1.27
600	1.68	0.38	1.58
800	1.87	0.44	1.91
1000	2.00	0.48	2.28

$E_{\text{cat}} = -2000\text{mV}$			
$E_{\text{ox}} (\text{mV})$	$R_0 (\text{mol L}^{-1}\text{s}^{-1})$	α	$[\text{PEDOT}^*] (\text{mol e}^- \text{L}^{-1})$
0	0.74	0.46	0.92
200	1.15	0.44	1.27
400	1.45	0.49	1.63
600	1.60	0.47	1.99
800	1.72	0.47	2.39
1000	1.86	0.52	2.92

Tabla 2. R_0 es la ordenada en el origen y β es la pendiente de la recta y el orden de reacción respecto del potencial catódico, para prepolarización inicial constante sobre la película, para cada potencial anódico y variando la concentración de electrolito LiClO_4 (0.05, 0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 y 1M) en acetonitrilo como disolvente. Estos resultados provienen de saltos de potencial desde dos potenciales catódicos: -1000 y -2000mV hasta varios potenciales anódicos.

Los valores de α se muestran similares a ambos potenciales -1000 y -2000mV , lo cual implica que la concentración de electrolito LiClO_4 no influye sobre la cinética química de la reacción de PEDOT en la película de estudio. Así los valores similares de α obtenidos provienen de rectas prácticamente paralelas y esto indica que existe control químico^{3, 4} en la oxidación de PEDOT.

4 Conclusiones

El control de las variables químicas cinéticas queda definido y cuantificado, con la obtención de valores numéricos para los coeficientes α , β y k . Su evolución predice que la cinética de estos materiales se hace más lenta cuando sometemos a la película a sobrepotenciales catódicos mayores. El valor constante esperado para el parámetro k , sólo se mantiene invariable a potenciales bajos de prepolarización, así la explicación a que la cinética se haga más lenta es un cambio en la estructura del material, cuando la estructura se reduce, cierra y compacta no favoreciéndose la libre oxidación del material.

La constancia del parámetro α , implica la no influencia de la concentración del electrolito LiClO_4 para distintos potenciales de oxidación de PEDOT y el control químico sobre la cinética de oxidación de los polímeros conductores, en este caso PEDOT.

Agradecimientos

Los autores agradecen la financiación al Ministerio de Ciencia e Innovación (MICCIN) (MAT2008-06702/MAT), Fundación Séneca (08684/PI/08).

Referencias

- [1] T. F. Otero and E. Angulo. "Solid State Ionics", pp. 803-809, vol. 63-65 (1993).
- [2] T. F. Otero, H-J Grande and J. Rodríguez. "J. Phys. Chem. B" pp. 3688-3697, vol. 101 (1997).
- [3] T. F. Otero, M. Caballero Romero. "I Jornadas de Introducción a la Investigación" pp. 32-34, vol. 1 (2008).
- [4] T. F. Otero, M. Caballero Romero. "Journal of Physics: Conference Series" vol. 127 (2008). Doi: 10.1088/1742-6596/127/1/012016.

Modelado de Ecosistemas

Eduardo Pardo Martínez, Javier Gilabert

Departamento de Ingeniería Química y Ambiental,
Universidad Politécnica de Cartagena, Paseo Alfonso XIII, 48, 30203 Cartagena (Murcia)
Grupo de Investigación "Ecosistemas"

Resumen. *A partir de los ecosistemas estudiados por esta área, se pretende validar como los modelos numéricos pueden servir como herramienta para la elaboración de estudios de predicción. El Delta del Ebro y la laguna del Mar Menor son dos ecosistemas muy importantes desde puntos de vista económico y ambiental. Desarrollando modelos hidrodinámicos y calibrándolo con datos reales de campañas y de históricos, se pueden plantear diferentes escenarios para el estudio de la cuña salina del Delta del Ebro y la tasa de renovación de agua del Mar Menor.*

1 Introducción

Los ecosistemas de transición entre la tierra y el mar tienen una gran importancia ecológica y socio-económica. Son altamente dinámicos con significantes gradientes de salinidad, en los cuales se producen importantes procesos, físicos y biológicos ([1] Morris *et al.*, 1995). Su particular estructura en forma de gradiente físicos y químicos producen un alto dinamismo en la distribución de parámetros, como materia disuelta, dispersión de contaminantes, nutrientes, fitoplancton, zooplancton y larvas de otros organismos ([2] Jouanneau and Latouche, 1982). Un uso sostenible de estos ecosistemas proporcionará a largo plazo un saludable sistema ecológico que repercutirá en la economía local, sin embargo estos criterios de sostenibilidad muchas veces no se aplican, o no son claramente comprendidos ([3] Gönenc and Wolflin, 2005).

En el Mediterráneo español dos ecosistemas emblemáticos son el Delta del Ebro y el Mar Menor. En el delta del Ebro se configura una cuña salina caracterizada por un alto grado de estratificación de la columna de agua formado entre las continuas descargas de agua dulce del río, y el agua salada del mar. El Mar Menor es una laguna costera hipersalina con una dinámica muy diferente donde también se aglutinan un elevado número de intereses naturales y socio-económicos como la agricultura, el turismo, la industria pesquera y actividades de recreo.

Como ejemplo del potencial que presentan las herramientas de modelado de ecosistemas se han elegido estos dos ecosistemas como lugares de estudio piloto para el desarrollo de técnicas de predicción basadas en modelos hidrodinámicos, herramienta indispensable para este objetivo. En el caso del delta del Ebro, se ha elegido como ejemplo en este estudio, el comportamiento de la pluma salina, mientras que en el Mar Menor, la tasa de renovación de agua con el Mediterráneo adyacente.

2. Áreas de Estudio

El Ebro tiene 928 km de longitud. La media de descarga anual ha decrecido desde $592 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ al comienzo del siglo pasado a $424 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ en los últimos 30 años, como resultado del intensivo uso del agua en su cuenca. Es el río mediterráneo más importante de España, formando un delta con un área de 320 km^2 , el 77% del área total es dedicado a la agricultura, mientras que el resto es ocupado por espacios naturales. El delta lo forma unos 35 km de río con una media de profundidad de 6,8 m y una media de anchura de 237 m. ([4] Ibáñez *et al.* 1996).

El Mar Menor es una laguna costera hipersalina, con una superficie de 135 km^2 y un perímetro de 59,51 km. Tiene una profundidad media de 3,6 m y una máxima de 6,0 m. La Manga es una barrera de arena de 22 km de longitud y entre 100 y 900 m de ancho, que hace de separación entre la laguna y el Mar Mediterráneo. Es atravesado por tres canales principales de comunicación con el mar abierto, Marchamalo, El Estacio y Las Encañizadas ([5] Pérez-Ruzafa *et al.* 2005).

El rango de mareas en ambos casos, Ebro y Mar Menor, es muy bajo, con valores de $\sim 20 \text{ cm}$.

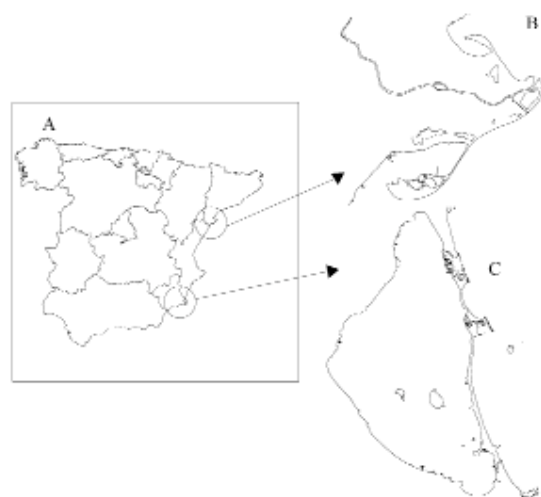


Fig. 1. A. Mapa de España mostrando la situación del delta del Ebro y la laguna del Mar Menor. B Mapa general del delta del Ebro. C Mapa general del Mar Menor.

3. Materiales y Métodos

Para el estudio de la pluma del Ebro se llevó a cabo una campaña en el delta durante el verano de 2008. En dicha campaña se obtuvieron datos de concentración salina y temperatura, ver Fig. 2. En cada muestreo fueron identificadas dos capas bien estratificadas, de agua dulce y agua salina, así como en la profundidad que se encontraba la interfase. Otros parámetros, como concentración de oxígeno disuelto, clorofila y turbidez, fueron también medidos para futuros estudios. Los datos de marea fueron tomados del histórico comprendido en esas fechas.

En el Mar Menor para estimar la tasa de renovación entre la laguna y el mar Mediterráneo se obtuvieron datos históricos de velocidad de viento y nivel de marea de la zona de estudio, entre dos años consecutivos. También se obtuvieron los valores de velocidad del agua en el canal del Estacio, por los datos suministrados por un correntómetro durante la toma de datos.

Para el estudio de ambas zonas se utilizó un programa de modelado hidrodinámico. Mohid es un programa baroclino de elementos finitos, diseñado para modelar costas y estuarios ([6] Martins *et al.* 2001), permitiendo aplicaciones al delta del Ebro donde la estratificación y mezcla de agua, y una compleja topografía son condiciones importantes. Al igual que para el caso del Mar Menor, donde las áreas de inundación ó secado y la integración de parámetros de velocidad del viento y mareas, son factores que definen el sistema.

El modelo

Delta del Ebro: El modelo pretende simular el comportamiento dinámico de la pluma de agua salina entrando en el delta. Para ello se parte de una malla de 100×100 m con una discretización espacial de cuatro capas de coordenadas cartesianas y una capa de coordenadas sigma, siendo un modelo en 3-D. El cauce del río es impuesto como límite del contorno y se le aplican los aportes de descarga de caudal de agua dulce. En los límites del mar abierto, el nivel del mar es impuesto por el armónico de mareas.

Mar Menor: Se modela los flujos de entrada y salida de agua, entre el Mediterráneo y la laguna, para poder estimar una tasa de renovación de agua en su interior. Estos flujos se producen en los canales de Marchamalo, Estacio y Las Encañizadas. Para ello se parte de una malla de resolución 100×100 m con una discretización vertical de coordenadas sigma de una sola capa, siendo una simulación en 2-D. El nivel del mar es impuesto desde el análisis del armónico de mareas, efecto de la presión atmosférica y el del viento sobre el mar.

En ambos casos Mohid resuelve las siguientes ecuaciones: Ecuaciones de continuidad, ecuaciones de Navier-Stokes, ecuaciones de transporte y ecuaciones de estado, que dan la dependencia que hay entre la densidad, la temperatura y la salinidad ([7] Leendertsee 1978).

4. Resultados

En la Fig.2 se muestra un perfil longitudinal del estuario del Ebro, el eje de coordenadas x, mide la distancia desde la desembocadura a tierra adentro. La figura representa la posición de la pluma en el delta, medido durante la campaña, donde en función del caudal de descarga del río, la posición de la pluma salina varía. Se observan dos capas de agua bien diferenciadas, una menos densa, la formada por el agua del río, que se desplaza por encima y en la misma dirección, pero en sentido contrario que la pluma de agua marina, que es más densa y que entra en las capas profundas del río en forma de cuña.

Una secuencia de la simulación de la tasa de renovación del Mar Menor, calculada por el modelo, se muestra en la Fig.3. Donde los flujos de entrada y salida de intercambio de agua en los canales, se ve influenciado por las mareas y los vientos. A través de una escala de grises, se ve la mezcla entre las dos masas de agua, Mediterráneo-Mar Menor, pudiendo estimar el tiempo, de la simulación, suficiente para renovar todo el volumen de agua de la laguna con agua del Mediterráneo, es decir, cuando la mezcla ya es de un 100%.

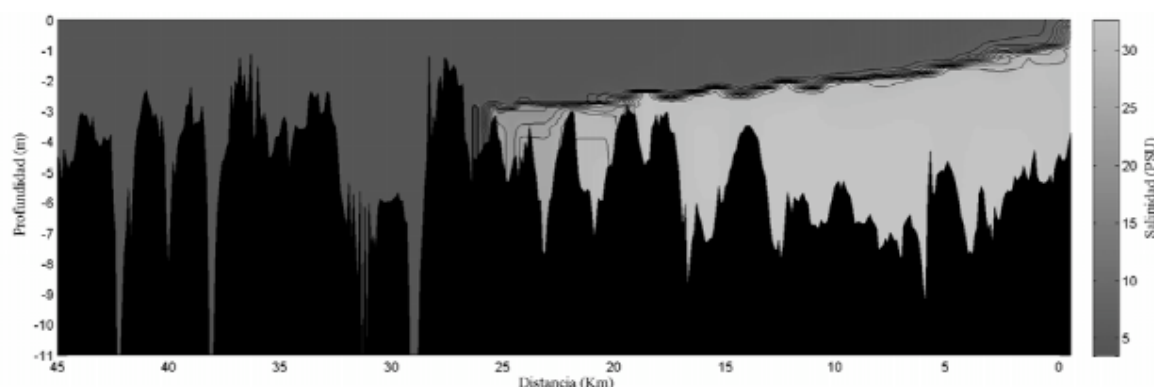


Fig. 2. Gráfica del contorno de la salinidad en el Delta del Ebro, obtenida en el muestreo del día 15/Mayo/2008.

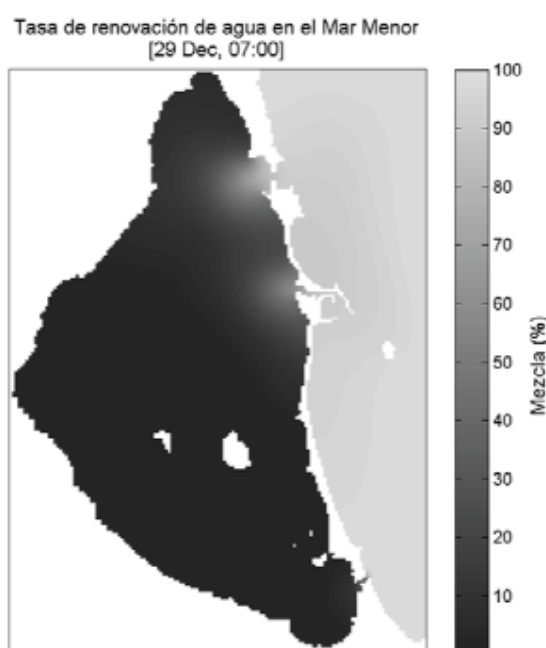


Fig. 3. Imagen de una secuencia de la simulación, realizada por el programa Mohid, de la tasa de renovación de agua entre el Mar Menor y el Mediterráneo.

Referencias

- [1] A. W. Morris, J.I. Allen, R. J. Howland and R. G. Wood. "The estuary plume zone: source or sink of land-derived nutrient discharges?". *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 40: 387-402 (1995).
- [2] J. M Jouanneau, and C. Latouche. "Estimation of fluxes to the ocean from mega-tidal estuaries under moderate climates and the problems they present". *Hydrobiologia*, 91: 23-29 (1982).
- [3] I. Ethem and J. P. Wolflin. "Coastal Lagoons". ISBN: 1-56670-686-6 (2005).
- [4] C. Ibañez, N. Prat, and A. Canicio. "Changes in the hydrology and sediment transport produced by large dams on the lower Ebro River and its estuary". *Regul.Rivers* 12: 51-62 (1996).
- [5] A. Pérez-Ruzafa, C. Marcos Diego, and J. Gilabert. "Coastal Lagoons". Chapter 9.3. en Ethem, I. and J. P. Wolflin (Eds.). "Coastal Lagoons". ISBN: 1-56670-686-6 (2005).
- [6] F. Martins, P. Leitao, A. Silva, and R. Neves. "3D modelling in the Sado estuary using a new generic vertical discretisation approach". *Oceanologica Acta*. 24: 1-12 (2001).
- [7] J. J. Leendeertse, and S. K. Liu. "A three-dimensional turbulent energy model for non-homogeneous estuaries and coastal sea systems". In *Hydrodynamics of Estuaries and Fjords* (Nihoul, J.C.J. Ed.). Elsevier Publ. Co., Amsterdam 387 405 (1978).

Comparación de dos métodos de estimación de la transpiración en almendro

P.A. Nortes*, G. Egea, A. Baille y M.M. González-Real

Área de Ingeniería Agroforestal. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica

Paseo Alfonso XIII, 48, 30203 Cartagena (Murcia)

Teléfono: 968 32 70 52 Fax: 968 32 7031

* E-mail: pedro.nortes@upct.es

Resumen. En este trabajo se compara la tasa de transpiración, medida con lisímetro de pesada en almendro sometido a diferentes regímenes hídricos, con una estimación de esta tasa a partir de medidas de flujo de savia mediante el método de compensación de pulso de calor. La dinámica de la transpiración medida con lisímetro y la del flujo de savia fueron similares. Empleando un ancho de herida de 3,4 mm se obtuvieron valores de flujo de savia similares a los medidos por el lisímetro, lo que muestra que tras una calibración previa, la técnica por compensación de pulso de calor es capaz de suministrar información precisa y detallada para el estudio de la dinámica a corto plazo del estado hídrico del almendro y su respuesta a factores abióticos desfavorables.

1 Introducción

La medida mediante métodos térmicos del flujo de savia que circula por el interior de los elementos conductores de los vegetales proporciona una estimación directa de la tasa de transpiración. El fundamento de esta técnica se basa en trabajos realizados a finales de los años 50 (Marshall, 1958), en los que se estudió la aplicación y transporte de calor como indicador del movimiento de la savia en el xilema. En los últimos años las medidas de flujo de savia han experimentado un notable desarrollo gracias a los avances tecnológicos (Green, 1998).

Entre los métodos que utilizan el calor para medir el flujo de savia, la técnica basada en la compensación de pulso de calor (CPC) (Swanson and Whitfield, 1981; Cohen et al, 1981) se ha utilizado con éxito en muchos especies leñosas: manzano (Green et al., 1989, 2003), kiwi (Green et al., 1989), peral (Caspari et al., 1993); albaricoque (Alarcón et al, 2003, Nicolás et al 2005), limonero (Ortuño et al 2004), melocotonero (Conejero et al 2007) y olivo (Fernández et al 2001, Gioro and Gioro 2003). Sin embargo, no se dispone de estudios que hayan aplicado este método en almendro.

El CPC es un método invasivo que requiere la inserción de dos juegos de termopares y una fuente de calor en el xilema. Esto provoca una perturbación del tejido xilemático, y por tanto de la transferencia de calor por convección, lo que puede ser causa de una infraestimación en la medida de la velocidad del pulso de calor (Cohen et al., 1981, Green and Clothier, 1988). Por ello, es necesario utilizar factores de corrección que dependen, entre otros, del tipo de material empleado y ancho de herida (Swanson and Whitfield, 1981).

El objetivo de este trabajo se centró (i) en la validación de la técnica de compensación de pulso de calor en almendro para la estima de la transpiración, empleando los factores de corrección propuestos por Green et al. (2003), y (ii) en la comparación de los valores estimados de tasa de transpiración con los medidos en un lisímetro de pesada.

2 Materiales y métodos

El trabajo se realizó durante el periodo junio-septiembre de 2008 en la estación experimental 'Tomás Ferro' de la Universidad Politécnica de Cartagena (37°35' N, 0°59' W), en una parcela de 1 ha de almendros (*Prunus dulcis* (Mill.) D.A. Webb cv Marta) injertados sobre patrón 'Mayor' con un marco de plantación 6m x 7m. El lisímetro de pesada ubicado en el centro de la parcela experimental tiene unas dimensiones de 6.3 m² en superficie y 1.7 m de profundidad. Las lecturas de las variaciones de peso fueron automatizadas mediante una célula de carga modelo FX2 (modelo Sensocar, España) con una precisión estimada de ± 500 g. Los datos fueron registrados cada 30 min por un datalogger CR1000 (Campbell Scientific). La célula de carga fue calibrada periódicamente *in situ*. El árbol se regó durante todo el año al 100 % de sus necesidades hídricas, excepto en agosto (DOY 212-240) que se suprimió riego. Al comienzo del ensayo el árbol presentaba una altura de 2.5 m, diámetros de tronco y copa de 0.15 m y 2.5 m respectivamente y 12 m² de área foliar.

Las medidas de flujo de savia (SF) se realizaron mediante la técnica CPC (Swanson and Whitfield 1981), a partir de dos juegos de sondas colocadas a 40 cm del suelo en dos orientaciones del tronco, con termopares a 5, 14, 26 y 40 mm de profundidad. La distancia de las sondas de temperatura con respecto al calentador fue asimétrica, 10 mm en el sentido del

flujo y 5 en sentido inverso. La velocidad de la savia se midió de acuerdo con los procedimientos descritos por Green y Clothier (1988), usando los anchos de herida propuestos por Green et al. (2003). Tanto el calentador como los sensores de temperatura fueron conectados a un datalogger Campbell CR10X y almacenados cada 30 min.

El contenido volumétrico de agua en el suelo (θ_v) se midió cada 30 min con dos sondas capacitivas (modelo ECHO2), colocadas a 30 cm de profundidad y a 15 cm del punto de goteo. El registro continuo de θ_v permitió calcular la fracción de agua extraíble del suelo (REW) en la zona radicular activa (Granier, 1987):

$$REW = \frac{\theta - \theta_{\min}}{\theta_{FC} - \theta_{\min}}$$

donde θ ($m^3 m^{-3}$) es el contenido actual de agua en el suelo, θ_{\min} ($m^3 m^{-3}$) el valor mínimo de contenido de agua en el suelo durante el experimento y θ_{FC} ($m^3 m^{-3}$) el contenido de agua en el suelo a capacidad de campo. Los valores correspondientes a θ_{\min} y θ_{FC} fueron 0.12 y 0.35 $m^3 m^{-3}$, respectivamente.

3 Resultados y Discusión

La obtención de resultados satisfactorios entre la transpiración diaria, medida con el lisímetro (E_{ly}), y la medida de flujo de la savia del tronco, $SF_{Tm} = (SF_N + SF_S)/2$ (Fig. 1) requiere que se aplique un elevado valor de ancho de herida (3,4 mm). Este valor es similar al propuesto por Green et al. (2003) (3,2 mm) en kiwi y viña, especies que presentan grandes vasos xilemáticos que afectan a la transmisión del pulso de calor, así como amplios espacios intersticiales en la madera que afectan a la homogeneidad térmica de la albura. El elevado factor de corrección necesario para el almendro en nuestro ensayo, indica que esta especie presenta probablemente una arquitectura hidráulica con grandes vasos y amplios espacios intersticiales en la albura, típica de especies tolerantes a la sequía (Núñez-Colín et al., 2006).

Influencia de la ubicación del sensor de caudal de savia

La figura 2 muestra las tasas horaria de flujo de savia para las sondas situadas en la cara norte (SF_N) y sur (SF_S , respectivamente) del tronco. Es de destacar que el patrón diario de ambas fue similar durante todo el periodo de estudio, siguiendo igualmente la dinámica de la tasa de transpiración a escala del árbol (E_{ly}). No obstante, se observaron diferencias entre los valores absolutos proporcionados por las dos sondas, siendo la tasa horaria de la cara sur 35% superior a la medida en la cara norte. Se encontró una estrecha relación lineal ($SF_N = 1,35 SF_S + 0,2$ $R^2 = 0,95$) entre el flujo de savia medido en ambas orientaciones, lo que sugiere la influencia de la localización de la sonda en los valores de flujo de la savia del tronco.

Otros autores (Granier, 1987 y Fernández et al. 2006), han obtenido también mayores tasas de SF en sondas colocadas en la cara sur del tronco. Este comportamiento puede atribuirse (i) a valores más altos de área foliar en la cara sur que conllevan una mayor interceptación de radiación solar en esta parte del árbol y (ii) a una mayor densidad de vasos xilemáticos en la cara sur del tronco.

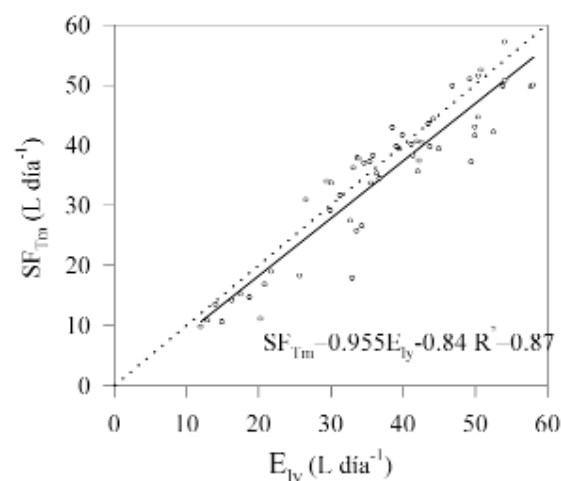


Figura.1. Relación entre el flujo de savia diario, SF_{Tm} (calculado empleando un ancho de herida de 3,4 mm) y la transpiración diaria E_{ly} (número de observaciones $n = 57$). La línea continua representa el ajuste lineal a la nube de puntos ($R^2 = 0.87$)

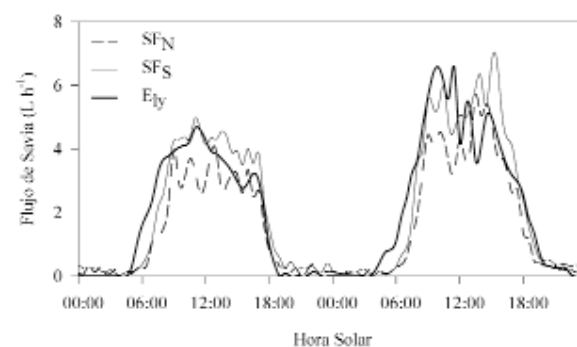


Figura. 2. Evolución de las tasas horarias de flujo de savia, determinadas por el método CPC con sensores colocados en la cara norte (SF_N) y sur (SF_S), y de la transpiración horaria lisimétrica (E_{ly}) durante los días 2-3 de Julio.

Respuesta a déficit de agua en el suelo

Los valores diarios de SF_N y SF_S registrados durante el mes de agosto disminuyeron progresivamente en respuesta al déficit de agua en el suelo debido a la supresión del riego (Figs. 3 y 4). Las tasas diarias de flujo de savia respondieron a la demanda climática, alcanzando valores máximos en los días de mayor demanda climática, tal y como se observa en los días con valores elevados de déficit de presión de vapor (DPV).

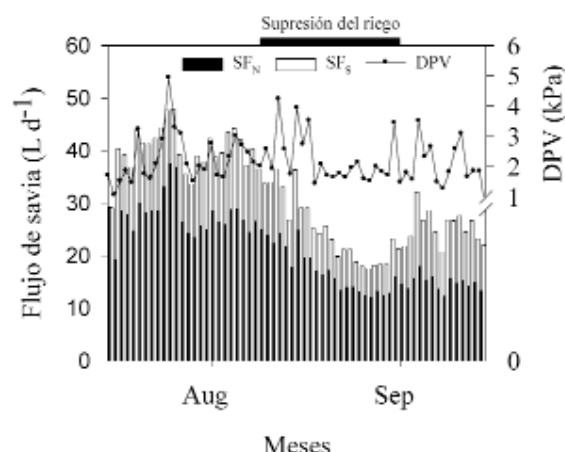


Figura 3. Evolución estacional de las tasas diarias de flujo de savia medidas con los sensores colocados en la cara norte (SF_N) y sur (SF_S) del tronco y valor diario máximo de DPV. La línea gruesa superior indica el periodo de supresión del riego.

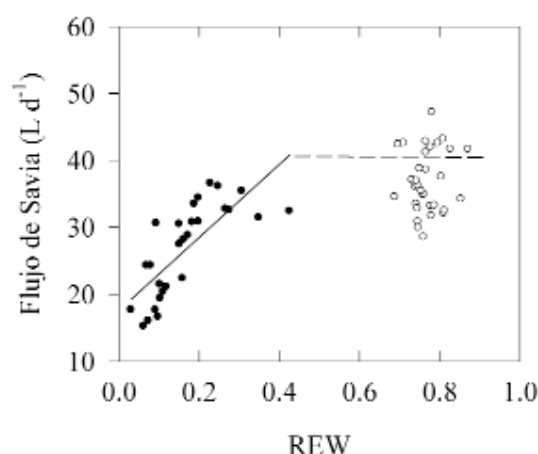


Figura 4. Relación entre el flujo de savia diario (SF_{TM}), y la fracción de agua extraíble del suelo al alba, (REW), durante dos periodos, 100% de la ET_c (○) y supresión del riego (●).

3 Conclusiones

La estimación de la transpiración a partir de las medidas de flujo de la savia del tronco con el método de compensación de pulso de calor (CPC) requiere un alto valor de ancho de herida, lo que sugiere que el almendro es una especie con grandes vasos xilemáticos. Parece recomendable utilizar un mínimo de dos sensores por árbol, colocados en sentido opuesto para eliminar la asimetría en el flujo de savia total. Se puede concluir que, una vez calibrada, la técnica CPC es capaz de suministrar información precisa y detallada para el estudio de la dinámica a corto plazo del estado hídrico del almendro y su respuesta a factores abióticos desfavorables.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto Europeo IRIQUAL (EC, FP6-2004-FOOD-3B-C023120).

Referencias

- [1] Alarcón, J.J., R. Domingo, S.R. Green, E. Nicolás y A. Torrecillas. 2003. Estimation of hydraulic conductance within field-grown apricot using sap flow measurements. *Plant Soil* 251:125-135.
- [2] Cohen, Y., Fuchs, M. y Green, G.C. 1981. Improvement of the heat-pulse method for determining sap flow in trees. *Plant Cell Environ.* 4: 391-397.
- [3] Conejero, W., Alarcón, J.J., García-Orellana, Y., Nicolás, E. y Torrecillas, A. 2007. Evaluation of sap flow and trunk diameter sensors for irrigation scheduling in early maturing peach trees. *Tree Physiol.* 27: 1753-1759.
- [4] Fernández, J.E., Palomo, M.J., Díaz-Espejo, A., Clothier, B.E., Green, S.R., Giron, I.F. y Moreno, F. 2001. Heat-pulse measurements of sap flow in olives for automating irrigation: tests, root flow and diagnostics of water stress. *Agric. Water Manage.* 51:99-123.
- [5] Giorio, P. y G. Giorio. 2003. Sap flow of several olive trees estimated with the heat-pulse technique by continuous monitoring of a single gauge. *Environ. Exp. Bot.* 49:9-20.
- [6] Granier A (1987) Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurements. *Tree Physiol.* 3:309-320.
- [7] Green, S.R. y B.E. Clothier. 1988. Water use of kiwifruit vines and apple trees by the heat-pulse technique. *J. Exp. Bot.* 198:115-123.
- [8] Green, S.R., B.E. Clothier y B. Jardine. 2003. Theory and practical application of heat-pulse to measure sap flow. *Agron. J.* 95: 1371-1379.
- [9] Green, S.R., K.G. McNaughton y B.E. Clothier. 1989. Nocturnal water use by kiwifruit and apples. *Agric. Forest Meteorol.* 48: 251-261.
- [10] Marshall, D.C. 1958. Measurement of sap flow in conifers by heat transport. *Plant Physiology* 33:385-396.
- [11] Nicolás, E., Torrecillas, A., Ortuño, M.F., Domingo, R. y Alarcón, J.J. 2005. Evaluation of transpiration in adult apricot trees from sap flow measurements. *Agric. Water Manage.* 72: 131-145.
- [12] Ortuño, M.F., Alarcón, J.J., Nicolás, E. y Torrecillas, A. 2004. Comparison of continuously recorded plant-based water stress indicators for young lemon trees. *Plant Soil* 267:263-270.

Producción de energía y depuración simultánea de aguas mediante Pilas de Combustible Microbianas. Aplicación a las aguas del sureste español.

A. Larrosa, A. Ginestá, L.J. Lozano, D. Juan, S. Sánchez, F.J. Hernández, A. Pérez, C. Godínez
Departamento de Ingeniería Química y Ambiental. Universidad Politécnica de Cartagena
C/ Dr. Fleming sn 30202 Cartagena (Murcia)
Teléfono: 968 326408 Fax: 968 326561
E-mail: carlos.godinez@upct.es

Resumen. En el presente trabajo se evalúa el efecto de la temperatura operacional en el rendimiento de pilas de combustible microbianas (MFCs) de dos cámaras. Este rendimiento se evalúa tanto desde el punto de vista de la producción de energía como de la depuración simultánea de las aguas residuales empleadas. De este estudio se puede concluir que la temperatura tiene un efecto positivo tanto en la producción de energía como en la eliminación de DQO de las aguas residuales. Además, las MFCs empleadas son capaces de convertir la biomasa significativamente por debajo de los 20°C y con bajas concentraciones de sustrato, lo que supone una ventaja competitiva frente a los digestores anaerobios convencionalmente empleados en la depuración de aguas residuales.

1. Introducción

Una pila de combustible microbiana (MFC, Microbial Fuel Cell) es un dispositivo que utiliza microorganismos para convertir la energía química contenida en un combustible en energía eléctrica. Esto es posible cuando bajo condiciones adecuadas, determinadas bacterias electroactivas pasan los electrones producidos en su actividad metabólica a un electrodo en lugar de a un aceptor de electrones (como oxígeno o nitrato tal y como ocurre en los procesos de depuración naturales). Esta tecnología hace posible la producción de una energía "verde" mediante la explotación de la biomasa contenida en las aguas residuales doméstica e industrial a la vez que se consigue la depuración de las mismas [1-3].

El potencial de las MFCs es enorme dado que esta novedosa tecnología aporta importantes ventajas funcionales y operativas sobre las tecnologías actualmente utilizadas para la generación de energía y para la depuración de aguas a partir de biomasa:

- La conversión de energía desde sustrato a electricidad es directa, permitiendo altas eficiencias
- Las MFCs operan eficientemente a temperatura ambiente, e incluso a muy bajas temperaturas distinguiéndose de todos los demás procesos bioenergéticos actuales.
- Una MFC no requiere tratamiento de gases debido a que los gases de escape están enriquecidos en CO₂ (de origen no fósil) y no tienen valor energético residual
- Las MFCs no tienen partes móviles y por tanto no necesitan aporte de energía siempre que el cátodo sea aireado pasivamente [2]
- Las MFCs tienen una amplia aplicación potencial en localizaciones donde se carece de infraestructura eléctrica, así como para ampliar la diversidad de

combustibles que utilizamos para satisfacer nuestra demanda energética

- Comparativamente con otras tecnologías de depuración de aguas tradicionales (digestión anaerobia), las MFCs generan menor cantidad de fangos con el consiguiente ahorro en los costes de deshidratación que tienen estos materiales

Sin embargo, hasta ahora las MFCs han generado niveles de potencia y eficiencias moderadas, por lo que se requiere un conocimiento más profundo de esta tecnología para su implementación práctica. El hecho de que en esta tecnología confluyan procesos electroquímicos y microbiológicos hace que la temperatura sea un parámetro de estudio de especial importancia [4]. Por ello, el objetivo de este trabajo es el estudio de la influencia de la temperatura (4 a 35°C) sobre el rendimiento de una batería de cuatro MFCs de doble cámara. El rendimiento será evaluado tanto desde el punto de vista de la capacidad de depuración de aguas residuales (eliminación de DQO) como de la capacidad de generación de energía (voltaje, potencia, y eficiencia coulombimétrica)[5].

2. Materiales y métodos

El agua residual empleada en el trabajo procede de la depuradora municipal de aguas residuales Murcia-Este (Murcia). El contenido en DQO deseado en cada ensayo se ajustó mezclando ésta agua con la procedente de una industria de biofuel local.

El tipo de MFC utilizada fue en forma de "H" que consiste en dos cámaras, la anódica y la catódica unidas por un tubo que contiene la membrana de intercambio protónico. En la cámara catódica se colocó el agua residual y en la anódica una disolución de tampón fosfato (pH=7). El ánodo utilizado en estos experimentos fue un trozo de tela de carbón de

2 cm de ancho por 3 cm de alto y el cátodo consistió en una malla de titanio con un recubrimiento de platino de las mismas dimensiones. La membrana utilizada en este trabajo es Nafion[®] 115 de 3,5 cm de diámetro con un espesor de 0,127 mm.

Cada experimento llevado a cabo contó con cuatro pilas de dos cámaras en serie (1a), 2 dos controles con tela de carbón (dummies) (1b) y 2 dos controles sin ella (1c). En los experimentos bajo carga eléctrica, los ánodos y cátodos se conectaron en circuito cerrado con resistores de 1 k Ω .

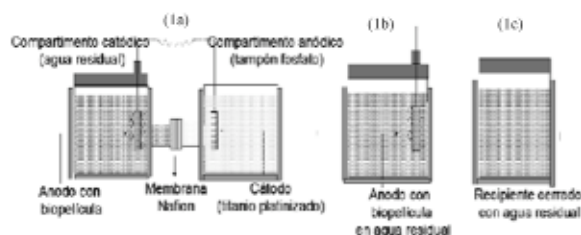


Figura 1. Dispositivo experimental.

Se monitorizó el rendimiento de las pilas durante 7 días a través de medidas continuas de voltaje (sistema de adquisición de datos de National Instruments denominado Measurements & Automation Explorer) y análisis diario de DQO (método fotométrico- *Test en cubetas de DQO* de MERCK). A partir del voltaje (E_{pila}) se determinaron la intensidad, la potencia y la eficiencia coulombica de las pilas.

La potencia normalizada para el volumen del reactor se obtiene según la siguiente expresión:

$$P_v = \frac{F^2}{VR_{ext}} \quad [1]$$

donde P_v es la potencia volumétrica (W/m³), y V es el volumen total del reactor.

La eficiencia coulombica, ϵC , se define como la relación entre el número de coulombios realmente transferidos al ánodo desde el sustrato y el número máximo posible de coulombios transferidos si todo el sustrato fuera capaz de producir corriente, es decir:

$$Y_Q = \frac{\text{coulombios totales producidos}}{\text{coulombios totales teóricos producibles}} \times 100$$

El total de coulombios obtenidos se determina integrando la corriente frente al tiempo, con el fin de poder obtener la eficiencia coulombica de una MFC alimentada en modo por lotes, C_b , evaluada durante un período de tiempo t_b , que se calcula como:

$$Y_Q = \frac{M_m \int i(t) dt}{F \cdot \Delta DQO \cdot b \cdot V} \times 100$$

Donde: M_m es la masa molecular de oxígeno (32 g/mol); $i(t)$ es la intensidad de corriente ($\Lambda = C/s$); F es la constante de Faraday (96485 C/mol de e⁻), ΔDQO es la variación de DQO durante el tiempo transcurrido t_b ($DQO_{inicial} - DQO_t$); b son los moles de electrones producidos por mol de oxígeno ($b=4$) y V es el volumen de líquido en la cámara anódica (0,25 l). La integral del numerador, que equivale a la carga acumulada, se calcula por el método de los trapecios.

3. Resultados y discusión

3.1. DQO

La Figura 2 muestra el porcentaje de eliminación de DQO en la media de las 4 pilas para cada una de las temperaturas de este estudio.

Se aprecian dos tendencias diferenciadas. Una tendencia a baja temperatura (4°C y 8°C) donde a las primeras 48 h, la velocidad de eliminación de DQO es lenta, para acelerarse después y alcanzar unos valores finales de en torno al 60 %. La otra tendencia observada es a altas temperaturas (de 30 a 35°C), donde la eliminación de DQO ya es bastante apreciable desde el primer día (un 35% a las 24 h) y a continuación crecer más lentamente hasta estabilizarse en unos valores finales próximos al 75%. Estas tendencias han sido las esperadas, ya que la temperatura favorece cinéticamente tanto los procesos electroquímicos como los microbianos, que son las reacciones que tienen lugar en la pila. También se observa un conjunto intermedio de temperaturas (de 15 a 25°C) en donde el comportamiento es, al principio, más parecido al de las pilas a baja temperatura, para luego crecer rápidamente y alcanzar valores semejantes a los de alta temperatura.

3.2. Voltaje

Observando la Figura 3, puede realizarse el análisis comparativo del comportamiento del voltaje generado por las pilas en circuito cerrado (1k Ω) en base a dos parámetros: el voltaje máximo alcanzado y el tiempo necesario para ello. Se aprecia cómo a 35°C, la temperatura más alta estudiada, se obtiene el valor máximo, como cabía esperar (en torno a 120 mV) si se tiene en cuenta la ecuación de Tafel. Este valor máximo disminuye a temperaturas inferiores, siendo de 50 mV entre 25 y 30°C, 35 mV a 20°C, e inferior a 6 mV para las temperaturas inferiores a 15°C. Con estos valores se deduce que un aumento de 10°C, al pasar de 25 a 35°C, se traduce en un incremento del voltaje al triple. Por último, en cuanto al tiempo necesario para alcanzar el voltaje máximo, es de 24 h a 35°C, siendo cada vez mayor a medida que se desciende en temperatura.

3.2. Potencia

En este caso, al igual que ocurre con el voltaje, la máxima potencia generada ($\approx 50 \text{ mW/m}^3$) se alcanza a la temperatura mayor, así como el tiempo mínimo en conseguirla (Figura 4). De la misma forma, a medida que disminuye la temperatura, la potencia máxima generada es menor, pero el máximo tarda más tiempo en conseguirse. Además, la mínima temperatura a la que es apreciable la generación de potencia en a 20°C . A partir de aquí, se pueden interpretar las curvas como ruido del sistema de adquisición de datos.

3.4. Eficiencia coulombica

En cuanto a la influencia de la temperatura sobre la eficiencia coulombica, en la Figura 5 se aprecia que la eficiencia coulombica aumenta para cada temperatura, a pesar de que la eliminación de DQO también lo hace. Esto indica que la producción de corriente se ve aún más favorecida con la temperatura que la eliminación de DQO.

4. Conclusiones

Desde el punto de vista de depuración de aguas residuales (centrado en eliminación de DQO) la temperatura afecta positivamente. La DQO se elimina más rápidamente cuanto mayor es la temperatura. Comparando las MFCs con los controles, a bajas temperaturas la eliminación de DQO es mejor en las primeras, por lo que, si se debe trabajar a bajas temperaturas, parecen más adecuadas éstas que la digestión anaerobia convencional. A altas temperaturas, sin embargo, se observaron fenómenos de inhibición en las pilas, que no se dan en los controles.

Desde el punto de vista energético, cuanto más alta es la temperatura empleada, mayor será la cantidad de electrones que llegarán al ánodo, con lo que se incrementará también la densidad de corriente, la diferencia de potencial producida y la potencia generada. Además, también lo es la eficiencia coulombica, lo que prueba que la producción de electricidad se ve más favorecida con la temperatura que la eliminación de DQO.

Lo expuesto anteriormente nos lleva a pensar que no existe una temperatura óptima de trabajo en una MFC, sino que la más alta posible, en el intervalo de temperaturas estudiado, es la que más beneficia la producción de energía. Sin embargo, no se puede decir que no deba trabajarse a temperaturas bajas. Entre las características más prometedoras de esta nueva tecnología está la mejora de la cinética de eliminación de materia orgánica a baja temperatura.

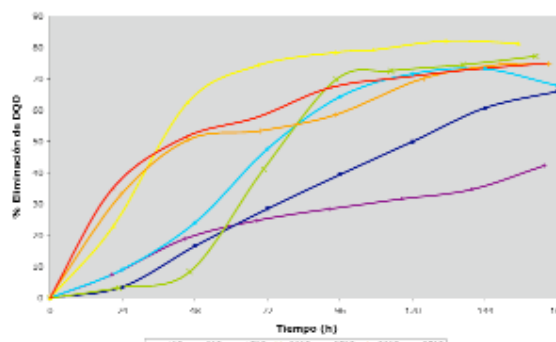


Figura 2. Porcentaje de eliminación de DQO con respecto al tiempo en las pilas para cada temperatura estudiada

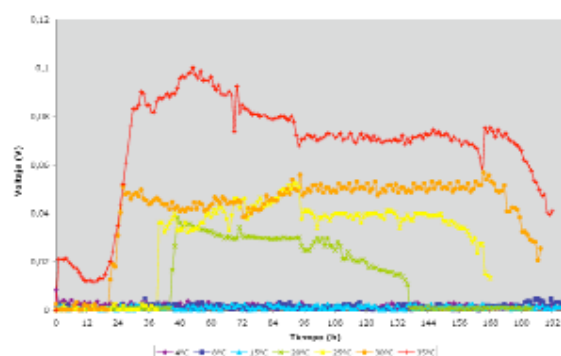


Figura 3. Voltaje con respecto al tiempo en las pilas para cada temperatura estudiada

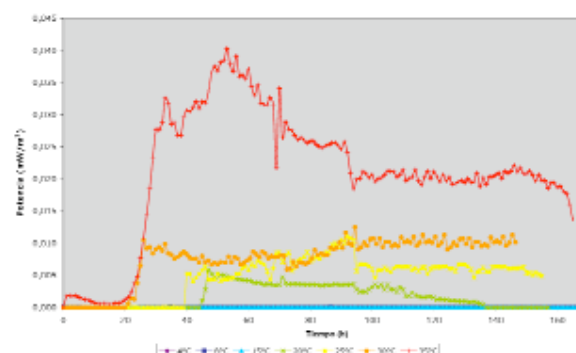


Figura 4. Potencia con respecto al tiempo en las pilas para cada temperatura estudiada

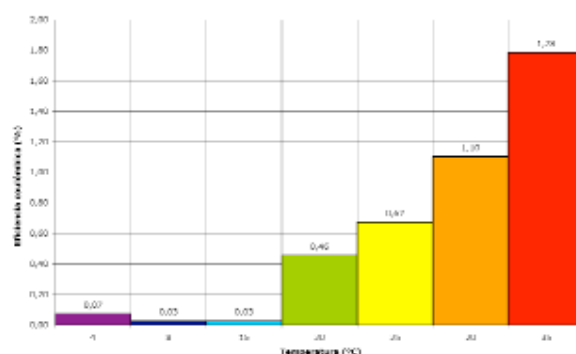


Figura 5. Porcentaje de eficiencia coulombica al final del experimento (168 horas) para cada temperatura estudiada.

Así, en lugares de clima frío la depuración por MFCs podría sustituir o complementar la digestión anaerobia, ahorrando de esta manera la energía necesaria para alcanzar temperaturas óptimas en esta última.

4. Perspectivas futuras

Los resultados obtenidos son enormemente alentadores pero aún así se requiere un mayor conocimiento de la tecnología para su implementación práctica, especialmente en la minimización de costes y en la creación de arquitecturas inherentemente escalables. Es en esta línea en la que el grupo INQUICA de la Universidad Politécnica de Cartagena, liderado por Carlos Godínez, viene trabajando los últimos años. El grupo ha logrado importantes avances en el desarrollo de cátodos elaborados con materiales de bajo coste suficientemente robustos. En la actualidad, el grupo está desarrollando nuevas membranas de intercambio iónico basadas en líquidos iónicos. Recientes trabajos indican que los líquidos iónicos pueden operar como excepcionales electrolitos conductores de protones [6] y sugieren que podrían ser incorporados en los futuros diseños de pilas de combustible.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia (ENE2006-09395) y cuenta con la colaboración de Aquagest y Emuasa.

Referencias

- [1] B.E. Logan, B. Hamelers, R. Rozendal, U. Schröder, J. Keller, S. Freguía, P. Aelterman, W. Verstraete, K. Rabaey, "Microbial fuel cells: methodology and technology". *Environmental Science and Technology*, pp 5181-5192, vol. 40 (2006).
- [2] H. Liu, R. Ramnarayanan, B.E. Logan, "Production of electricity during wastewater treatment using a single chamber microbial fuel cell". *Environmental Science and Technology*, pp 2281-2285, vol. 38 (2004).
- [3] K. Rabaey, P. Clauwaert, P. Aelterman, W. Verstraete, "Tubular microbial fuel cells for efficient electricity generation". *Environmental Science and Technology*, pp. 8077-8082, vol. 39 (2005).
- [4] Y. Han, S. Sung, R. Dague, "Temperature-phased anaerobic digestion of wastewaters sludges". *Water Science and technology*, pp. 367-374, vol. 36 (1997).
- [5] B.K. Ahring, M. Sandberg, I. Angelidaki, "Volatile fatty acids as indicators of process imbalance in anaerobic digestors". *Applied Microbiological Biotechnology*, pp 559-565, vol. 43 (1995)
- [6] A. Farnicola, S. Panero, B. Scrosati, "Proton-conducting membranes based on protic ionic liquids". *Journal of Power Sources*, pp. 591-595, vol. 178 (2008).

Evaluación precisa de iris en cavidades resonantes en guía de onda y aplicación a la caracterización dieléctrica de materiales

Francisco Javier Clemente Fernández, Juan Monzó Cabrera, Juan Luis Pedreño Molina,
Antonio José Lozano Guerrero, Alejandro Díaz Morcillo

Grupo de Electromagnetismo y Materia (GEM) - Universidad Politécnica de Cartagena (UPCT)
Edificio Antigones, Plaza del Hospital nº1, 30202 Cartagena (Murcia)
Teléfono: 968 32 5376 E-mail: fjcfl@alu.upct.es

Resumen. En este trabajo se presenta un procedimiento de caracterización dieléctrica de materiales basado en un método inverso aplicado a una cavidad resonante en guía de onda con un iris metálico a su entrada. Se hace especial hincapié en la caracterización precisa de dicho iris, con el objetivo de poder emplear técnicas usuales de concatenación de cuadripolos que simplifiquen el procedimiento.

1 Introducción

Previo al estudio de viabilidad sobre la aplicación de la energía microondas en cualquier proceso térmico industrial se necesita conocer las propiedades dieléctricas de los materiales a tratar y cómo se ven éstos afectados por la energía de microondas. Existen multitud de procedimientos de medida dependiendo de diversos factores como pueden ser las propiedades del material, su forma, su estado, etc. [1]

En particular, el objetivo de este trabajo es el de llevar a cabo la caracterización dieléctrica del material bajo estudio empleando para ello una cavidad resonante construida a partir de una guía de onda cortocircuitada con un iris metálico a su entrada.

La metodología empleada para obtener la permitividad eléctrica de la muestra está basada en lo que se conoce como técnica inversa [2]. De manera general, el procedimiento desarrollado consiste en encontrar mediante el uso conjunto de algoritmos genéticos de optimización y un simulador electromagnético, una constante dieléctrica tal que la respuesta de la cavidad simulada sea la misma que la de las medidas realizadas. Dicha constante dieléctrica será por tanto la que corresponde realmente a la muestra bajo estudio. Así, para llevar a cabo este procedimiento nos podemos aproximar desde varios frentes, desde trabajar con medidas en el dominio del tiempo, en el dominio de la frecuencia o empleando técnicas como la concatenación de cuadripolos. De esta forma, en este trabajo se presenta un resumen de la investigación desarrollada, haciendo hincapié en los resultados obtenidos y sobre todo en los inconvenientes que se nos presentan.

2 Diseño de la cavidad

Una de las cavidades de microondas más simples consiste en un tramo de guía de onda rectangular cortocircuitada en uno de sus extremos y alimentada a través de un iris [3], tal como muestra la Fig. 1.

Para el diseño del iris se ha utilizado el kit de guía de onda de Continental and Microwave Tool Company [4], en el cual se dispone de un tramo de guía rectangular WR-340 de 12,7 cm de largo.

Puesto que el objetivo es el de poder realizar medidas en el rango de 2-3 GHz, se realizó una simulación paramétrica de la cavidad vacía en este rango de frecuencias empleando el software CST Microwave Studio® 5.0 [5], variando tanto la abertura del iris como la longitud de la guía hasta el corto. A la vista de los resultados que se pueden observar en la Fig. 2, se optó por emplear una anchura de la abertura de 3,4 cm, que proporciona una resonancia alrededor de 2,9 GHz utilizando el tramo de guía disponible tal cual, sin acortar su longitud. Además, este valor es interesante porque nos permite un mayor margen de medida de permitividades, pues al introducir una muestra la frecuencia de la resonancia se reduce.

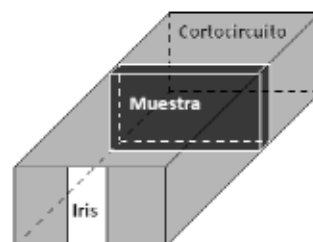


Fig. 1. Configuración de medida empleando una cavidad resonante.

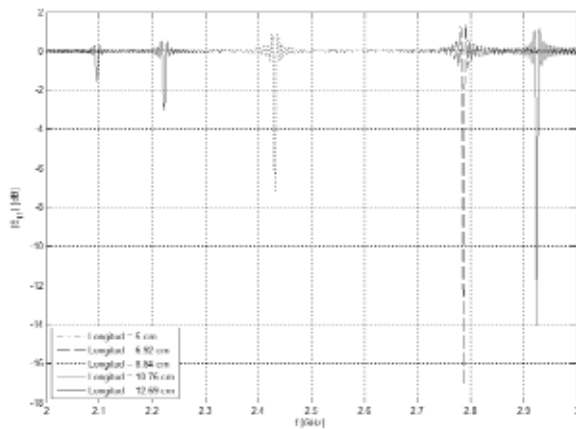


Fig. 2. Módulo en dB del parámetro S_{11} de la cavidad simulada para una abertura de 3,4 cm y diferentes longitudes.

De esta forma, tras realizar unas pruebas preliminares con un prototipo de iris cortado a mano, se fabricó un iris cortado por láser para intentar conseguir la máxima precisión posible en lo referente a las dimensiones y a la simetría de la pieza. El aspecto final de la cavidad completa se puede observar en la Fig. 3.

3 Caracterización de la cavidad

La idea que se llevó a cabo en este trabajo, tras descartar por sus malos resultados otras alternativas como la de trabajar en el dominio del tiempo, fue realizar la caracterización por separado del iris y el resto de la cavidad, y posteriormente realizar una concatenación de ambas redes para obtener la respuesta final. Además, de esta forma solamente hay que simular el tramo de guía de onda cortocircuitada y se le añade posteriormente dicha caracterización del iris. Resumiendo, las dos respuestas empleadas en la técnica inversa, medida y simulada, se obtienen de la siguiente forma:

- Respuesta medida: iris medido + guía medida + cortocircuito teórico.
- Respuesta simulada: iris medido + cavidad simulada.

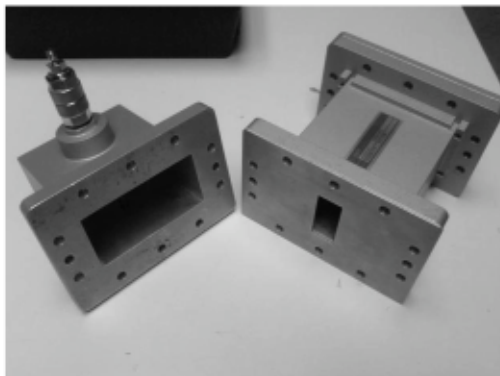


Fig. 3. Aspecto final de la cavidad de medida junto con el alimentador.

Con esto se solventa el problema relativo a la dificultad que tiene el simulador para simular estructuras altamente resonantes, además de disminuir considerablemente el tiempo de cómputo necesario para obtener una buena precisión. También se persigue con ello aumentar la repetitividad de la medida, ya que la respuesta de la cavidad completa es extremadamente sensible a cualquier pequeña variación de la posición del iris, inevitable por otra parte al realizar varias medidas independientes. Así, una vez conseguida la correspondencia entre simulación y medida para la cavidad vacía, se puede aplicar el procedimiento de medida inversa a la muestra bajo estudio. Los mejores resultados obtenidos se muestran en la Fig. 4, donde se representa una comparativa entre las respuestas medida y simulada empleando la concatenación de cuádrupolos, y la medida de la cavidad completa.

Se puede observar que no se consigue una buena precisión que nos permita llevar a cabo la medida inversa con garantías. Además, se observó también una repetitividad de la medida extremadamente baja, con resultados muy variables de una medida a otra, añadiendo pues otro factor que dificulta la obtención de resultados fiables.

4 Medida inversa

Si bien no fue posible llevar a cabo el procedimiento de medida inversa completo para obtener la permitividad eléctrica de materiales, sí que se desarrolló parte de dicho procedimiento, desarrollo que puede ser válido para cualquier otro trabajo relativo a este tema.

El procedimiento de medida inversa implica la comunicación entre Matlab® [6] y CST Microwave Studio®. De forma general, el proceso de medida consta de los siguientes pasos:

1. Lectura de las medidas del analizador de redes vectorial (Matlab).
2. Inicio del algoritmo genético (Matlab).

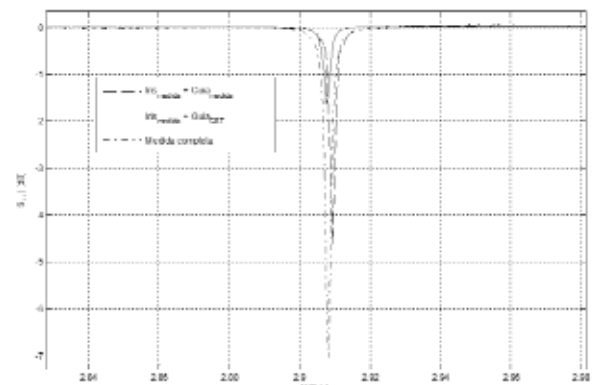


Fig. 4. Resultados finales para el módulo del parámetro S_{11} .

3. Llamada a CST mediante una macro para simular la estructura con la permitividad determinada por el algoritmo genético (Matlab).
4. Simulación, obtención y exportación de resultados (CST).
5. Importación de resultados y evaluación del error (Matlab).
6. Si el error es grande se ejecuta una nueva iteración del algoritmo genético y se vuelve al punto 2 (Matlab).

Así se desarrolló toda la parte de la comunicación entre Matlab y CST, incluida la macro para la simulación de la estructura, si bien no fue posible la aplicación práctica de este procedimiento.

5 Conclusiones

Los resultados obtenidos a lo largo del desarrollo de la investigación han revelado un problema de mayor complejidad de la que se pensaba inicialmente. El principal obstáculo de la baja repetitividad de la medida, tanto en lo referente a la calibración como a la medida en sí, unido al hecho de la dificultad del simulador electromagnético para simular estructuras tales como la tratada, han imposibilitado la obtención de resultados de calidad.

No obstante, el trabajo realizado no ha sido en balde. Sin duda ha servido para conocer en profundidad esta problemática, conocimiento que por supuesto se puede incorporar a investigaciones futuras. De hecho, en parte gracias a este trabajo se han abierto otras puertas en la investigación de transiciones coaxial a guía de onda para la conformación de cavidades, que culminarán próximamente en nuevas publicaciones.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado bajo el proyecto "Caracterización Dieléctrica de Materiales en Banda Ancha Empleando Técnicas Inversas", asociado a una "Beca de Iniciación a la Actividad Investigadora" de la Universidad Politécnica de Cartagena.

Referencias

- [1] J. B. Jarvis et al., "Measuring the permittivity and permeability of lossy materials: solids, liquids, metals, building material, and negative-index materials," *National Institute of Standards and Technology Technical Note 1536*, Feb. 2005.
- [2] M. F. Requena-Pérez, A. Albero-Ortiz, and J. Monzó-Cabrera, "Combined use of genetic algorithms and gradient descent optimization methods for accurate inverse permittivity measurement," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 54, pp. 615-624, Feb. 2006.
- [3] D. Stuerger and M. Lallemand, "Far Beyond Small Perturbations," *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, vol. 28, no. 2, pp. 73-83, 1993.
- [4] www.cobhamdes.com
- [5] www.cst.com
- [6] www.mathworks.com

Producción de Hidrógeno a partir de Energía Solar Fotovoltaica

R. García-Valverde

Dpto. Electrónica, Tecnología de Computadores y Proyectos (DETCP)

Universidad Politécnica de Cartagena

Plaza del Hospital, 1, 30202 Cartagena (Murcia)

Teléfono: 968 32 6514 Fax: 968 32 7031

E-mail: rafael.gvalverde@upct.es

Resumen. El acoplamiento de un generador fotovoltaico (FV) y de un electrolizador es una de las opciones más prometedoras para obtener hidrógeno desde una fuente de energía renovable. Ambas son tecnologías bien conocidas, sin embargo debido a la variabilidad de la radiación solar, un acoplamiento eficiente todavía supone un reto. El acoplamiento directo y a través de convertidor CC/CC son las opciones utilizadas en aplicaciones aisladas. En este trabajo, se presentan modelos de comportamiento para el generador FV, el electrolizador y el convertidor CC/CC. Los modelos han sido implementados y simulados en Matlab/Simulink. También se propone un algoritmo de control específico para el acoplamiento generador FV-electrolizador a través de convertidor CC/CC. Las simulaciones realizadas demuestran que el algoritmo propuesto permite una mayor adaptabilidad a la variación de radiación solar que otras opciones de acoplamiento y flexibiliza el diseño independiente del generador FV y del electrolizador.

1 Introducción

En los últimos años se ha hablado mucho del uso energético del hidrógeno, como combustible limpio alternativo a los combustibles fósiles. Además su uso en pilas de combustible, se asocia a sistemas de generación energética de alta eficiencia. Sin embargo, el hidrógeno prácticamente no existe de manera libre en su forma molecular (H_2) en la Tierra, sino que aparece asociado a moléculas mayores (H_2O , hidrocarburos, etc.). Por tanto, el H_2 será limpio y renovable si en el proceso utilizado para su obtención se evita, o al menos se minimiza, la emisión de gases de efecto invernadero.

Una de las maneras más prometedoras de obtener hidrógeno desde una fuente de energía renovable es la electrólisis del agua a partir de electricidad solar fotovoltaica [1-6]. Este sistema consiste en el acoplamiento de un generador FV a un electrolizador de agua, dispositivo electroquímico donde se produce la separación del H_2O en H_2 y O_2 .

Tanto la fotovoltaica (FV) como los electrolizadores son tecnologías bien conocidas. Sin embargo su acoplamiento óptimo presenta todavía algunos retos importantes [7]. La salida de potencia de un generador FV depende de la radiación solar, por lo que está caracterizada por intermitencia y alta variabilidad. Potencias de operación muy bajas con respecto a la nominal (5-25%) pueden provocar situaciones peligrosas dentro del electrolizador y los fabricantes imponen una potencia de alimentación mínima para una operación segura [8,9]. Este problema es especialmente importante en aplicaciones donde el electrolizador no es alimentado desde otras fuentes (Ej: la red eléctrica o un banco de baterías).

Por otra parte, el acoplamiento FV- H_2 debe de maximizar la potencia de salida desde el generador FV, haciendo que éste trabaje siempre que sea posible en el punto de máxima potencia (MPP) para cada condición de radiación solar y temperatura.

Algunos autores han defendido el acoplamiento directo [14-16]. El generador FV es una fuente de corriente continua y el electrolizador se comporta como una carga de corriente continua. Ambos sistemas son muy modulares y un dimensionado óptimo permite el acoplamiento directo. Sin embargo el acoplamiento directo reduce la flexibilidad de dimensionado y para electrolizadores de elevada potencia implica utilizar generadores FV con salida de corriente muy elevada, lo que supone aumentar la sección de los cables de interconexión, aumentando las pérdidas por transmisión. Además de no asegurar que el generador FV funcione siempre en el MPP.

Otros autores [17-19] han demostrado o sugerido eficiencias más altas del sistema FV- H_2 utilizando un acoplamiento a través de un convertidor CC/CC que implemente un seguimiento del MPP. Esta opción ofrece también una mayor flexibilidad de diseño, sin embargo el seguimiento del MPP puede llevar al electrolizador a trabajar en condiciones de operación no seguras.

El objetivo de este trabajo es proponer un algoritmo de seguimiento del MPP para el acoplamiento FV- H_2 a través de CC/CC, que a su vez asegure la operación segura del electrolizador. Para su validación se han implementado en Matlab/Simulink un modelo de generador FV, de Electrolizador tipo PEM, de convertidor CC/CC y del controlador que implementa el algoritmo.

2 Modelización

2.1 Generador FV

El modelo de generador FV está basado en el propuesto por Lorenzo et al. [20]. Este modelo asume determinadas condiciones que permiten extraer los parámetros característicos del modelo equivalente de un diodo para una célula FV general, a partir de los datos técnicos que ofrecen los fabricantes en las hojas de características de los módulos FV comerciales.

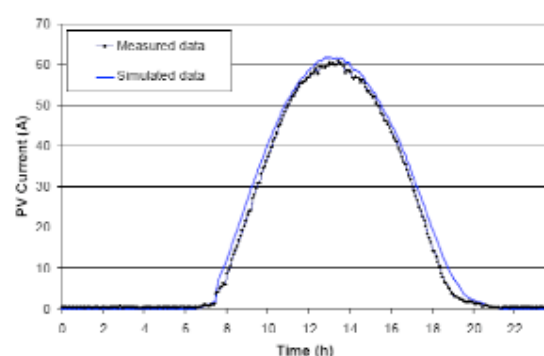


Fig. 1 Corriente de salida del generador FV de la UMU para un día soleado. Medida cada 5min y simulada con el modelo propuesto.

El modelo permite extender estos parámetros a un generador FV equivalente y calcular la curva I-V y el punto de funcionamiento para unas condiciones de operación dadas.

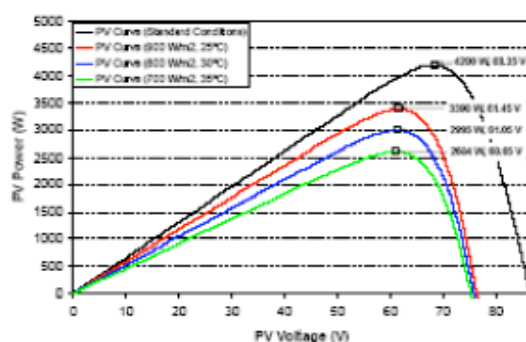


Fig. 2 Curvas P-V para un generador FV de 4.2kWp

El modelo de generador FV ha sido simulado y comparado con datos experimentales obtenidos de la instalación FV aislada de la Universidad de Murcia [21]. La Fig. 1 muestra la validación del modelo. La Fig. 2 representa diferentes curvas potencia-voltaje para un generador FV de 4.2kWp, en ella se puede observar como el MPP varía con las condiciones temperatura y radiación solar.

2.2 Electrolizador PEM

La electrolisis del agua es la disociación de su molécula en H_2 y O_2 . Un electrolizador es el

dispositivo electroquímico en el que se lleva a cabo dicha reacción. Los electrolizadores de membrana de intercambio protónico (PEM), se caracterizan por la membrana de intercambio protónico situada entre los dos electrodos de cada celda electrolítica. Esta membrana sirve como electrolito para el intercambio iónico (es un medio ácido que hidratado conduce protones) y como separador de las cámara anódica y catódica (es impermeable al paso de electrones y de gases).

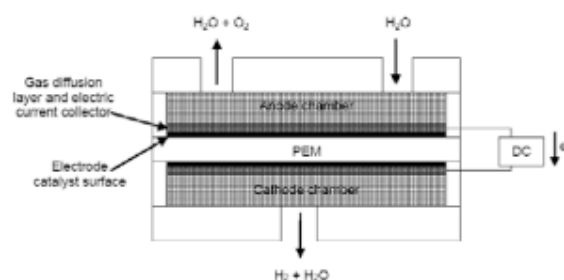


Fig. 3 Esquema de una celda electrolítica tipo PEM

Como en toda reacción electroquímica, entre los electrodos existe un potencial reversible o potencial de Nernst, potencial mínimo para que la reacción comience, y que depende de la temperatura y de la presión a la que se lleva a cabo la reacción. No obstante, para que la reacción comience se debe aplicar una corriente continua entre los electrodos. Al circular corriente aparecen limitaciones asociadas a la no idealidad de los electrodos (limitaciones de transferencia de carga y de transporte) y del electrolito (resistencia óhmica e iónica). Estas limitaciones se traducen en la práctica en un aumento del voltaje entre electrodos conforme se inyecta más corriente a la celda electrolítica. La Fig. 4 muestra la curva voltaje frente a densidad de corriente (V-i) para una celda electrolítica. En ella se puede observar el efecto de las limitaciones de transferencia de carga (sobrepotencial de activación), de transporte (sobrepotencial de concentración) y de los efectos resistivos (sobrepotencial iónico y óhmico).

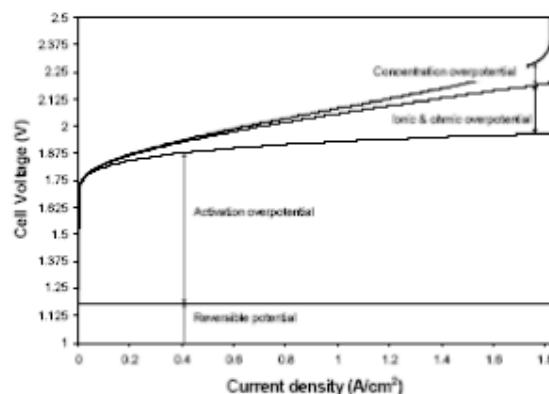


Fig. 4 Curva i-V (curva superior) simulada para una celda electrolítica PEM a una presión de 1

atm y 80°C y el efecto parcial sobre la curva de cada sobrepotencial.

Las celdas electrolíticas se asocian en serie para obtener voltajes de operación mayores, y el diseño de celdas con áreas mayores lleva a corrientes de operación más elevadas. La producción de hidrógeno es proporcional a la corriente que circula por cada celda (ley de Faraday), por lo que cuanto mayor sea la corriente, mayor será la velocidad de producción de hidrógeno, aunque la reacción será menos eficiente debido al mayor sobrepotencial. La temperatura y la presión a la que se produce la reacción electrolítica afecta tanto al potencial reversible de partida como a los diferentes sobrepotenciales (Fig. 5). El modelo completo debe incluir el comportamiento electroquímico y el termodinámico. El desarrollo completo del modelo de electrolizador está descrito en [22].

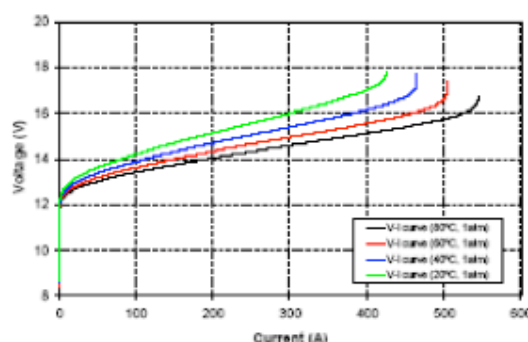


Fig. 5 Curvas V-I simuladas para un electrolizador de 7 celdas en serie de 300cm² de área cada una

En la práctica se debe asegurar que el electrolizador funcione dentro del rango lineal de la curva i-V, para evitar el trabajo por debajo de una potencia mínima y por encima de la potencia máxima.

2.3 Convertidor de CC/CC

Los convertidores CC/CC son dispositivos de electrónica de potencia utilizados en aquellas aplicaciones en las que se necesita un voltaje o una corriente de salida menor o mayor que el voltaje o la corriente de entrada. Esto se logra controlando el tiempo de conmutación de los interruptores internos. En FV son habitualmente utilizados para hacer trabajar al generador siempre lo más cerca posible de su MPP. De entre las diferentes topologías de convertidores CC/CC (reductor, elevador, etc. [23]), en este trabajo se ha elegido el reductor-elevador, por cubrir todo el espectro de resistencias de entrada, aunque en la práctica en la mayoría de sistemas FV-H₂ se necesitará únicamente el comportamiento reductor.

El modelo de convertidor de CC/CC utilizado es un modelo simplificado en el que se asume su funcionamiento en modo continuo en todo momento y las componentes de frecuencia son totalmente filtradas a la salida. Así el modelo está basado en la relación entre la resistencia de entrada y la carga de salida, relacionadas por la relación de conmutación (δ) y la eficiencia del convertidor (η):

$$V_{in} = \frac{V_{out}}{\eta} \frac{1-\delta}{\delta} \quad (1)$$

$$I_{out} = I_{in} \eta \frac{1-\delta}{\delta} \quad (2)$$

3. Controlador Propuesto

El convertidor CC/CC actúa como interfaz de potencia entre la fuente de corriente (el generador FV) y la carga a alimentar (el electrolizador), adaptando el voltaje de trabajo del generador FV lo más cercano posible a su MPP y manteniendo la corriente de entrada al electrolizador dentro de los límites de seguridad, es decir dentro de su zona lineal.

Para ello, el algoritmo propuesto a partir de los valores de voltaje y corriente de entrada y salida al convertidor, realiza la búsqueda de un punto de trabajo que cumpla dos condiciones: 1) La derivada segunda de la potencia de entrada al electrolizador sea 0, manteniéndolo así dentro de su zona lineal de trabajo y 2) la derivada primera de la potencia de salida del generador FV esté lo más cercana posible a 0 (punto de máxima potencia).

En la simulación el controlador es un bloque de Simulink sobre el que se ha programado el algoritmo propuesto (Fig. 6). Sin embargo el algoritmo no requiere cálculos complicados y puede ser implementado de manera sencilla en cualquier microcontrolador con puertos A/D y capaz de implementar salidas PWM.



Fig. 6 Diagrama de flujo del algoritmo de control propuesto

4. Resultados de la Simulación y Discusión

Los modelos anteriores junto con el controlador propuesto han sido implementados en Simulink/Matlab. El diagrama de bloques del sistema final es mostrado en la Fig. 7.

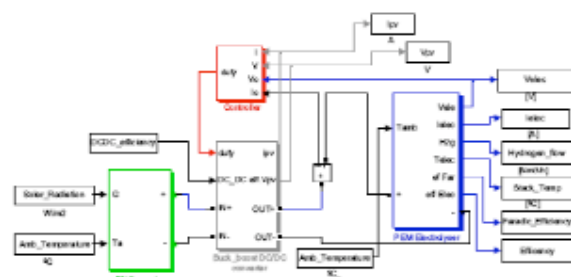


Fig. 7 Diagrama de bloques en Simulink/Matlab del sistema FV-H₂ propuesto

En la Fig. 8 se muestra una comparación estática (punto de operación para unas condiciones ambientales y de reacción electroquímica determinadas) entre: a) acoplamiento directo, b) acoplamiento con un CC/CC que implementa sólo la búsqueda del MPP; y c) acoplamiento con un CC/CC que implementa el algoritmo propuesto. Se puede observar que el acoplamiento directo se podría mejorar buscando una combinación de módulos FV que adaptara el rango de voltajes de operación del generador al del electrolizador, aunque incrementaría la corriente por los cables y las pérdidas por transmisión. En el caso del convertidor CC/CC que implementa sólo la búsqueda del MPP, vemos que el punto de operación puede llevar al electrolizador a trabajar en una zona no segura.

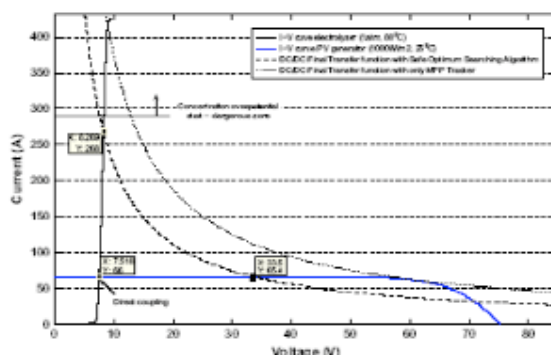


Fig. 8 Punto de operación de un sistema FV-H₂ con acoplamiento directo y mediante convertidor CC/CC implementado sólo la búsqueda del MPP y con el algoritmo propuesto.

Para comprobar el comportamiento dinámico (cambios de las condiciones ambientales) se han simulado dos configuraciones de electrolizador: 1) un electrolizador con 7 celdas en serie y 300cm^2 de celda elegido para mejorar el control térmico de la reacción electrolítica (Opción 1); y 2) un electrolizador con 30 celdas en serie de 70cm^2 , especialmente elegido para optimizar el acoplamiento directo con el generador FV (Opción 2). Estas dos configuraciones son alimentadas desde un generador FV de 4.2kWp (2 líneas en serie de 20 módulos en paralelo de 106 Wp cada uno). Los dos sistemas FV-H₂ han sido simulados utilizando acoplamiento directo y a través de convertidor CC/CC con el algoritmo propuesto. Las cuatro combinaciones han sido sometidas a una misma secuencia de variación de la radiación solar cada 10 segundos. La Fig. 9 muestra la salida de hidrógeno del electrolizador en las cuatro combinaciones.

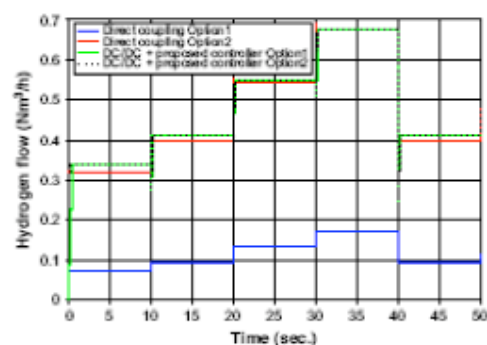


Fig. 9 Flujo de H₂ de salida para dos sistemas FV-H₂, sin convertidor CC/CC y con convertidor CC/CC controlado por el algoritmo propuesto.

Se puede comprobar que utilizando el controlador propuesto la producción de hidrógeno se maximiza, al hacer trabajar siempre al generador FV cercano a su MPP y además esa mejora es independiente de la relación de diseño elegida para el electrolizador o para el generador FV. Esto último flexibiliza el diseño relativo entre el generador FV y el electrolizador, hecho que en sistemas de elevada

potencia puede suponer una importante reducción en las pérdidas por transmisión en el cableado y facilitar el control térmico y de presión en el electrolizador.

5. Conclusiones

En este trabajo se ha introducido la problemática del acoplamiento entre un generador fotovoltaico y electrolizador de agua para la producción de hidrógeno "limpio y renovable". Se han presentado e implementado en Matlab/Simulink modelos de comportamiento para el generador FV, el electrolizador tipo PEM y el convertidor CC/CC. Se ha propuesto un algoritmo específico de control para el acoplamiento generador FV-electrolizador a través de convertidor CC/CC. El sistema total ha sido simulado utilizando Matlab/Simulink. Los resultados de las diferentes simulaciones demuestran que el algoritmo propuesto permite una mejora en la eficiencia de la producción de hidrógeno sin llevar al electrolizador a puntos de operación no seguros y además permite independizar el diseño del generador FV del electrolizador.

Agradecimientos

Agradecemos la financiación de esta trabajo al proyecto HOPE CSD2007-00007 (Consolider-Ingenio 2010) y a la beca FPU AP2005-2271.

Referencias

- [1] Chaparro AM, Soler J, Escudero MJ, de Ceballos EML, Wittstadt U, and Daza L. Data results and operational experience with a solar hydrogen system. *Journal of Power Sources*, 144(1):165-169, 2005.
- [2] Bilgen E. Domestic hydrogen production using renewable energy. *Solar Energy*, 77(1):47-55, 2004.
- [3] Vidueira JM, Contreras A, and Veziroglu TN. PV autonomous installation to produce hydrogen via electrolysis and its use in FC buses. *International Journal of Hydrogen Energy*, 28(9):927-937, September 2003.
- [4] Bilgen E. Solar hydrogen from photovoltaic-electrolyzer systems. *Energy Conversion and Management*, 42(9):1047-1057, 2001.
- [5] Meurer C, Barthels H, Brocke WA, Emonts B, and Groehn HG. PHOEBUS—an autonomous supply system with renewable energy: six years of operational experience and advanced concepts. *Solar Energy*, 67(1-3):131-138, 1999.
- [6] Galli S and Stefanoni M. Development of a solar-hydrogen cycle in Italy. *International Journal of Hydrogen Energy*, 22(5):453-458, 1997.
- [7] Barbir F. PEM electrolysis for production of hydrogen from renewable energy sources. *Solar Energy* 2005;78(5):661-9.
- [12] Electrolysers N.H: www.hydroelectrolysers.com
- [13] Hydrogenics Corporation: www.hydrogenics.com
- [14] Arriaga I.G, et al. Direct coupling of a solar-hydrogen system in Mexico. *International Journal of Hydrogen Energy* 2007; 32(13):2247-52.
- [15] Shapiro D, Duffy J, Kimble M, Pien M. Solar-powered regenerative PEM electrolyzer/fuel cell system. *Solar Energy* 2005;79(5):544-50.
- [16] Biddyut P, Andrews J. Optimal coupling of PV arrays to PEM electrolyzers in solar-hydrogen systems for remote area power supply. *International Journal of Hydrogen Energy* 2008;33(2):490-8.
- [17] Ahmad GE, El Shenawy ET. Optimized photovoltaic system for hydrogen production. *Renewable Energy* 2006;31(7):1043-54.
- [18] Solmecke H, Just O, Hackstein D. Comparison of solar hydrogen storage systems with and without power electronic DC/DC converters. *Renewable Energy* 2000;19 (1-2):333-8.
- [19] Contreras A, Guirado R, Veziroglu TN. Design and simulation of the power control system of a plant for the generation of hydrogen via electrolysis, using photovoltaic solar energy. *International Journal of Hydrogen Energy* 2007;32 (18):4635-40.
- [20] Lorenzo E, et al. Solar electricity-engineering of photovoltaic systems. Seville (Spain): PROGENSA; 1994.
- [21] Instalación FV de la UMU: <http://sustainable-tech.inf.um.es>
- [22] García-Valverde R., et al. Optimized photovoltaic generator-water electrolyser coupling through a controlled DC/DC converter *International Journal of Hydrogen Energy* 2008; 33 : 5352-5362
- [23] Rashid MH. Power electronics circuits, devices and applications. 2nd ed. Prentice Hall; 1993.

Diseño Óptimo de Comités de Redes Neuronales Artificiales

Pedro J. García Laencina*, José Luis Sancho Gómez.

Departamento de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones
Universidad Politécnica de Cartagena. Plaza del Hospital 1, 30202 Cartagena
Teléfono: (+34) 968326542. E-mail: pedroj.garcia@upct.es

Resumen. Las máquinas de aprendizaje, y particularmente, las redes neuronales artificiales (RNA), tienen aplicación en multitud de problemas reales: control automático, detección de señales, estimación de variables financieras, filtros 'antispam', etc. Una manera eficiente para mejorar la capacidad de generalización de una RNA es diseñar un conjunto de máquinas ('committee of machines' o 'network ensembles'), cuya solución global es el resultado de combinar la estimación proporcionada por cada máquina. Este artículo propone un novedoso, rápido y eficiente método para el entrenamiento de comités de máquinas basado en el algoritmo 'Extreme Learning Machine'.

1. Introducción

Las Redes Neuronales Artificiales (RNAs) han sido empleadas con éxito en multitud de aplicaciones [1]. Sin embargo, presentan diversos inconvenientes durante el proceso de optimización de los hiper-parámetros (i.e., pesos y número de neuronas) como son el elevado tiempo computacional requerido y la convergencia a soluciones sub-óptimas (mínimos locales) para un determinado problema al usar técnicas de optimización basados en gradiente [1]. Recientemente, el algoritmo de entrenamiento conocido como *Extreme Learning Machine* [2], [3] ha permitido solventar estos claros inconvenientes que presentan las técnicas tradicionales de entrenamiento de RNA. Destaca el trabajo dirigido por Lendasse [3], donde se propone *Optimal Pruned-Extreme Learning Machine* (OP-ELM), que constituye un eficiente método para la selección óptima del número de neuronas en RNAs basadas en ELM.

Sin embargo, en lugar de emplear una única máquina para modelar un determinado problema, un procedimiento muy recomendable es modelar dicho problema mediante un conjunto de máquinas, cuya solución viene dada por la combinación de la salida obtenida por cada una de las máquinas [4]. Siguiendo esta filosofía, este trabajo extiende el algoritmo OP-ELM para obtener el conjunto óptimo de RNAs, proponiendo una nueva técnica para el entrenamiento de comités de RNAs: *Optimal Committee of Extreme Learning Machines*, OCoELM. Los resultados obtenidos en problemas de regresión muestran las ventajas de las máquinas OP-ELM y el algoritmo propuesto OCoELM.

2. Perceptrones Multicapa

Las RNAs del tipo "feed-forward", o Perceptrones Multicapa (Multi-Layer Perceptron, MLP), constan

de múltiples capas de unidades computacionales (neuronas) interconectadas, pudiendo aproximar cualquier función continua seleccionando los hiper-parámetros (pesos y número de neuronas) adecuadamente [1]. Una arquitectura MLP estándar está compuesta de una capa oculta de h neuronas. Los pesos de la capa de entrada conectan las n variables de entrada con las h neuronas, mientras que una segunda capa de pesos conecta las salidas de las h neuronas con las m unidades de salida del MLP. Considerar un vector de entrada $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T \in \mathbb{R}^d$, con "target" $\mathbf{t} = [t_1, t_2, \dots, t_m]^T \in \mathbb{R}^m$. De esta forma, la salida del MLP viene dada por

$$\mathbf{y} = \sum_{j=1}^h \mathbf{v}_j z_j = \sum_{j=1}^h \mathbf{v}_j f(\mathbf{w}_j^T \mathbf{x} + b_j), \quad (1)$$

donde $\mathbf{y} = \{y_k\}_{k=1}^m$, $f(\cdot)$ son las funciones de activación de las neuronas ocultas, $\mathbf{v}_j = [v_{j1}, v_{j2}, \dots, v_{jm}]^T$ son los pesos de salida asociados a la neurona oculta j -ésima, mientras que $\mathbf{w}_j = [w_{j1}, w_{j2}, \dots, w_{jn}]^T$ y b_j representan respectivamente el vector de pesos de entrada y el sesgo correspondientes a dicha neurona. z_j es la salida de la neurona j -ésima de la capa oculta. Las unidades de salida tienen funciones de activación lineales, mientras que para $f(\cdot)$ se suelen emplear funciones de tipo sigmoide. La Figura 1 muestra un MLP estándar.

Los hiper-parámetros a optimizar durante el entrenamiento son los pesos y el número de neuronas. Generalmente, se establece un número de neuronas h , después \mathbf{w} y \mathbf{v} son inicializados aleatoriamente, y a partir de un conjunto de N patrones de entrenamiento asociado al problema a resolver, la red es entrenada mediante el algoritmo "back-propagation", junto con métodos de optimización basados en gradiente. El número óptimo de neuronas es seleccionado

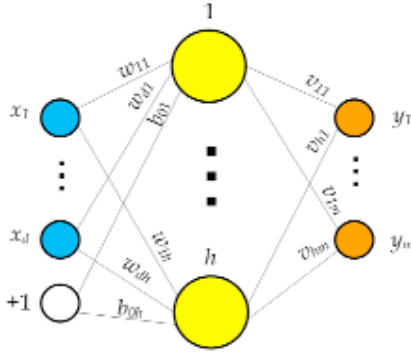


Fig. 1. Arquitectura estándar MLP.

por validación cruzada [1]. Este entrenamiento conlleva un gran número de iteraciones, y una búsqueda exhaustiva del parámetro h , lo que puede suponer un elevado coste computacional en determinadas aplicaciones. Para más detalles de implementación/diseño, ver [1].

3. Extreme Learning Machine

El algoritmo *Extreme Learning Machine* (ELM) está fundamentado en que un MLP compuesto por h neuronas, cuyos pesos de entrada están inicializados aleatoriamente, pueden “aprender” N distintos casos de entrenamiento produciendo un error cero, siendo $N \geq h$, y aproximar cualquier tipo de función continua [2]. Tras inicializar de manera aleatoria los pesos de entrada, un MLP puede ser considerado como un sistema lineal y los pesos de salida pueden obtenerse de manera analítica mediante un simple cálculo de la pseudo-inversa de la matriz de las salidas de las h neuronas ocultas para un determinado conjunto de entrenamiento. De esta forma, dado un conjunto de N vectores de entrada, un MLP con h neuronas ocultas puede aproximar estos N casos con error nulo ($\sum_{i=1}^N \|y_i - t_i\| = 0$), i.e., existen v_j , w_j y b_j tal que,

$$\sum_{j=1}^h v_j z_{ij} - t_i, \quad i = 1, \dots, N, \quad (2)$$

siendo $z_{ij} = f(\mathbf{w}_j^T \mathbf{x}_i + b_j)$. Las anteriores N ecuaciones se pueden expresar:

$$\mathbf{ZV} = \mathbf{T}, \quad (3)$$

donde $\mathbf{Z} \in \mathbb{R}^{N \times h}$ es la matriz de salidas de la capa oculta de neuronas del MLP, $\mathbf{V} \in \mathbb{R}^{h \times m}$ es la matriz de pesos de salida, y $\mathbf{T} \in \mathbb{R}^{N \times m}$ es la matriz de “targets” de los N casos de entrenamiento. De esta forma, el entrenamiento del MLP viene dado por la solución del problema de mínimos cuadrados establecido en (3), es decir, los pesos óptimos de la capa de salida son

$$\hat{\mathbf{V}} = \mathbf{Z}^\dagger \mathbf{T}, \quad (4)$$

donde \mathbf{Z}^\dagger es la pseudo-inversa de Moore-Penrose [5]. ELM proporciona un entrenamiento rápido y eficiente para MLPs [2], aunque es necesario pre-establecer

el número de neuronas ocultas. A continuación se describe el algoritmo OP-ELM que permite seleccionar, de manera unívoca, las neuronas que constituyen la capa oculta del MLP [3].

3.1. Selección Óptima de Neuronas

El método *Optimal Pruned-ELM* (OP-ELM) [3] establece un número inicial muy elevado de neuronas ocultas ($h \gg N$), y mediante el algoritmo *Least Angle Regression* (LARS) [6] elimina/poda aquellas variables (neuronas) que no son útiles para resolver el problema de mínimos cuadrados. Para ello ordena el conjunto posible de neuronas, conforme a su importancia para resolver (3). La solución obtenida por LARS es única cuando el problema es lineal [6]. La poda de neuronas es realizada mediante validación cruzada del tipo Leave-One-Out (LOO), escogiendo aquella combinación de neuronas (que han sido previamente ordenadas mediante el algoritmo LARS) que proporciona menor error de validación [3]. Por tanto, únicamente son seleccionadas las h^* neuronas más importantes según LARS (con $h^* < h$), y junto con el entrenamiento ELM, se obtiene una solución única y óptima para el diseño de un MLP.

3.2. Experimentos para OP-ELM

A continuación, se emplea un problema sencillo de regresión unidimensional para mostrar las capacidades de OP-ELM. Se han generado artificialmente $N=1000$ casos de entrenamiento, según la suma de dos señales sinusoidales y ruido aleatorio gaussiano. La Figura 2 muestra con puntos azules el conjunto de datos de entrenamiento. A continuación se ha entrenado un MLP mediante OP-ELM, empleando un tiempo de cálculo de 5,47 s (segundos). La Figura 2 muestra el modelo obtenido por OP-ELM en rojo. Podemos comprobar que el resultado obtenido es muy preciso, y más teniendo en cuenta que únicamente han sido necesarios poco más de cinco segundos para el modelado final.

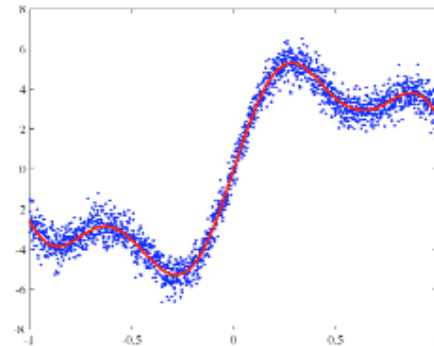


Fig. 2. Regresión unidimensional mediante OP-ELM.

A continuación, se resuelve el conocido problema de regresión *Abalone* [7], que consta de $N=4177$ casos y $n=8$ características de entrada. Los hiper-parámetros del MLP han sido seleccionados mediante validación cruzada (10 “folds”), y para el entrenamiento se ha

usado el algoritmo de gradiente conjugado escalado [1]. Para solventar el problema de los mínimos locales, se han realizado 10 inicializaciones aleatorias de pesos, y se ha seleccionado el número de neuronas mediante búsqueda exhaustiva entre 1 y 20 neuronas. El entrenamiento estándar del MLP obtiene un error de test igual a 4,34 tras 2640 s, mientras que OP-ELM obtiene un error de test igual a 4,50 tras emplear 25 s. Podemos comprobar como OP-ELM obtiene resultados prácticamente similares al MLP estándar, siendo el tiempo de cálculo 100 veces más rápido.

4. Método Propuesto: OCoELM

El método OP-ELM sigue siendo sensible a la inicialización de los pesos del MLP, por lo que es necesario realizar múltiples inicializaciones y escoger aquella máquina entrenada que proporciona mejor capacidad de generalización según un criterio de validación cruzada, descartando los restantes MLPs.

Para cada inicialización, OP-ELM proporciona una arquitectura con diferente número de neuronas (una solución distinta). Según esta metodología, se está desperdiciando la gran cantidad de información presente en cada uno de los MLPs entrenados. A pesar de que las máquinas descartadas proporcionan modelos sub-óptimos para el problema, la combinación de las predicciones obtenidas por el conjunto de MLPs puede proporcionar una solución más sólida y precisa que la obtenida por un único MLP. Las técnicas de combinación de RNAs se conocen como *Committe Machines* o *Network Ensembles* [4]. La Figura 3 muestra un comité de máquinas, donde se aprovecha la diversidad existente en distintos MLPs combinando sus correspondientes estimaciones para obtener una mejor solución.

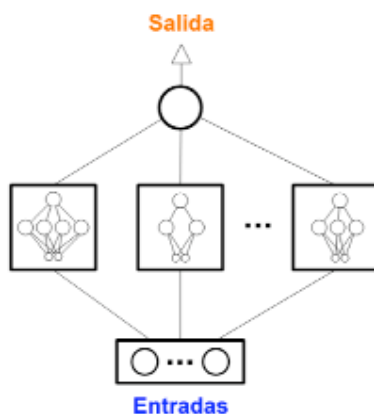


Fig. 3. Comité de MLPs.

Considerar un conjunto de L máquinas diferentes que han sido entrenadas para modelar un determinado problema (con target t), siendo y_1, y_2, \dots, y_L las salidas obtenidas por cada una de las L máquinas. Una primera aproximación es obtener la salida global

(o) como el promedio de las L salidas:

$$o = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L y_l. \quad (5)$$

Sin embargo, una solución más eficiente es una combinación lineal de los L modelos:

$$o = \sum_{l=1}^L \lambda_l y_l, \quad (6)$$

por lo que es necesario resolver el siguiente problema de mínimos cuadrados:

$$\sum_{l=1}^L \lambda_l y_{il} = t_i, \quad i = 1, \dots, N, \quad (7)$$

donde y_{il} es la salida del l -ésimo MLP para el vector \mathbf{x}_i . Cada MLP ha sido entrenado mediante OP-ELM. El método propuesto extiende OP-ELM combinando las estimaciones proporcionadas por L^* máquinas (con $L^* < L$), que han sido seleccionadas, de manera automática y óptima, como aquellas que obtienen una mejor aproximación global a t , es decir, una mejor solución global al problema objetivo. Para ello, al igual que OP-ELM, se utiliza el algoritmo LARS (ver Sección 3, [6]) para resolver (7), obteniendo aquellos L^* valores de λ_l que proporcionan una solución global óptima para el problema definido en (7). El método propuesto se denomina *Optimal Committee of Extreme Learning Machines* (OCoELM).

5. Simulaciones para OCoELM

Se han modelado cuatro problemas de regresión: *Friedman*, *Elevators*, *Stocks* y *Banks*, para mostrar las ventajas de OCoELM sobre OP-ELM. Los conjuntos de datos están disponibles en [7]. A continuación, se describen brevemente cada uno de estos problemas:

- *Friedman*. Este problema ha sido generado artificialmente a partir de 10 variables (x_1, x_2, \dots, x_{10}) uniformemente distribuidas en el intervalo $[0, 1]$. Consta de 27179 patrones de entrenamiento, mientras que otros 13589 patrones componen el conjunto de test. La función objetivo a aproximar es: $t = 10 \sin(\pi x_1 x_2) + 20(x_3 - 0.5)^2 + 10x_4 + 5x_5 + \sigma(0, 1)$, donde $\sigma(0, 1)$ representa ruido blanco gaussiano con media cero y varianza unidad.
- *Elevators*. Este conjunto de datos se obtiene a partir de la tarea de controlar un avión F16. Se pretende modelar la variable relacionada con una acción realizada en los elevadores de la aeronave a partir de 18 variables continuas. Se dispone de 8752 vectores de entrenamiento y 7847 vectores de test.
- *Stocks*. Este conjunto de datos contiene los valores diarios de las acciones para diez empresas del sector aeroespacial, a partir de Enero de 1988 hasta Octubre de 1991. El objetivo es predecir el valor de la acción de una de las empresas a partir

de los valores correspondientes a las restantes empresas, por lo que está compuesto por 9 variables continuas de entrada. El conjunto de datos de entrenamiento consta de 634 patrones, mientras que el conjunto de test consta de 316 vectores de entrada.

- *Bank*. Este problema ha sido generado sintéticamente para modelar cómo los clientes eligen sus bancos. El conjunto de datos consta de 4499 patrones para la fase de entrenamiento y se dispone de 3693 patrones para la fase de test. Cada vector de entrada está definido a partir de 8 variables continuas.

Cada problema es modelado mediante 20 MLPs distintos entrenados mediante OP-ELM, considerando un número máximo de 100 neuronas. Posteriormente, los MLPs entrenados se combinan de manera óptima empleando el método propuesto. La Tabla 1 muestra los resultados obtenidos en términos de error cuadrático medio (MSE, Mean Square Error) y tiempo de cálculo:

- E_{OP-ELM} , MSE obtenido por el mejor MLP entrenado con OP-ELM;
- E_{COoELM} , MSE obtenido por COoELM;
- T , tiempo total empleado para entrenamiento de los 100 MLPs con OP-ELM;
- ΔT , incremento de tiempo para COoELM.

Junto a E_{OP-ELM} y E_{COoELM} se muestra entre paréntesis el número de neuronas óptimo según OP-ELM (h^*) y el número de MLPs seleccionados por COoELM (L^*).

	<i>Friedman</i>	<i>Elevators</i>
E_{OP-ELM}	7,12 (64)	14,08E-6 (76)
E_{COoELM}	6,19 (16)	9,39E-6 (16)
T	2464 s.	2246 s.
ΔT	65,59 s.	30,12 s.

	<i>Stocks</i>	<i>Bank</i>
E_{OP-ELM}	1,33 (82)	2,10E-3 (80)
E_{COoELM}	0,78 (12)	1,40E-3 (14)
T	69,29 s.	1836 s.
ΔT	0,88 s.	18,15 s.

TABLA 1

RESULTADOS OBTENIDOS POR OP-ELM Y COoELM.

Las ventajas de COoELM sobre OP-ELM son evidentes, sobre todo en los problemas *Elevators*, *Stocks* y *Banks*. Por ejemplo, el problema *Stocks* es resuelto en 69,29 s mediante OP-ELM, obteniendo un MLP óptimo con 82 neuronas ocultas que proporciona un MSE igual a 1,33. Sin embargo, el método COoELM emplea 0,88 s adicionales para diseñar un comité de 12 MLPs que proporciona un MSE igual a 0,78. Así, COoELM consigue reducir el error MSE en un 41,35 % incrementando únicamente el tiempo de entrenamiento en un 0,98 %, con respecto a OP-ELM. Según los resultados obtenidos, COoELM mejora claramente la capacidad de generalización obtenida por OP-ELM en todos los

problemas simulados, empleando un escaso tiempo adicional de cómputo.

6. Conclusiones

Este trabajo propone un nuevo método de entrenamiento óptimo para comités de máquinas basado en *Extreme Learning Machine* (ELM). ELM proporciona un entrenamiento rápido y eficiente para MLPs. El reciente algoritmo *Optimal Pruned-ELM* (OP-ELM) permite seleccionar, de manera automática y óptima, las neuronas de la capa oculta de un MLP entrenado mediante ELM. A partir de OP-ELM, este artículo describe *Optimal Committee of Extreme Learning Machines* (COoELM) que permite diseñar una combinación óptima de MLPs entrenados con OP-ELM. COoELM mejora notablemente las prestaciones obtenidas por un solo MLP basado en OP-ELM, ya que salida global del comité aprovecha la diversidad proporcionada por cada una de las máquinas incluidas en el mismo.

Referencias

- [1] C. M. Bishop, *Neural Networks for Pattern Recognition*, New York, USA: Oxford University Press (1995).
- [2] G.-B. Huang, Q.-Y. Zhu, C.-k. Siew, "Extreme Learning Machine: Theory and Applications", *Neurocomputing*, 70(1-3), pp. 489-501, (2006).
- [3] Y. Miche, P. Bias, C. Jutten, O. Simula, A. Lendasse, "A methodology for Building Regression Models using Extreme Learning Machine", *16th European Symposium in Artificial Neural Networks*, pp. 247-252, Bruges, Belgium, 2008.
- [4] L. Hansen, P. Salamon, "Neural Network Ensembles", *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 12 (10), pp. 99-1001, 1990.
- [5] A. Bjork, *Numerical Methods for Least Squares Problems*, SIAM, Philadelphia, 1996.
- [6] B. Efron, T. Hastie, I. Johnstone, R. Tibshirani, "Least Angle Regression", *Annals of Statistics*, vol. 32, pp. 407-499, (2004).
- [7] <http://www.liaad.up.pt/~ltorgo/Regression/DataSets.html>

Modelado Matemático del Control de Flujo en HSDPA

Gaspar Pedreño, Juan J. Alcaraz y Fernando Cerdán

Departamento de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones,

Universidad Politécnica de Cartagena,

Plaza del Cronista Isidoro Valverde, Edificio "La Milagrosa", CP. 30202 Cartagena.

{gaspar.pedreno, juan.alcaraz, fernando.cerdan}@upct.es

Abstract—El objetivo de este artículo es mostrar el desarrollo teórico que caracteriza el algoritmo de control de flujo de HSDPA que de manera intuitiva/empírica se expone en [1]. Con dicho fin, se presenta un detallado estudio analítico donde este control de flujo es abordado como un problema de optimización cuadrática. Para resolver este problema se hace uso de técnicas de programación dinámica (Dynamic Programming, DP) [2].

Index Terms—HSDPA, Control de Flujo, Optimización, Programación Dinámica

I. INTRODUCCIÓN

HSDPA (*High Speed Downlink Packet Access*) [3] fue introducido por el 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*) en la especificación de *Release 5* con el objetivo de aumentar la velocidad de transmisión de datos en sentido downlink, mejorar la QoS percibida por el usuario y lograr un menor coste por bit entregado. Todo ello con respecto al tráfico a ráfagas (servicios de tipo interactivo, streaming y background) para el cual está diseñado.

El concepto HSDPA se basa en la implementación de un nuevo canal de transporte compartido en sentido downlink, denominado HS-DSCH (*High Speed Downlink Shared Channel*) [3], y en la transferencia de algunas funcionalidades de la capa MAC desde la RNC (*Radio Network Controller*) hasta el Nodo B donde aparece ahora la capa MAC-hs (*Medium Access Control-high speed*). El resto de capas/protocolos de la red de acceso radio que se encuentran por encima de la capa MAC son los mismos que en la arquitectura que se presentó en *Release 99* para UMTS, sin modificación alguna. No obstante, el protocolo RLC (*Radio Link Control*) sólo puede operar en modo con o sin reconocimiento, pero no en modo transparente debido al cifrado. La figura 1 ilustra la estructura de protocolos de la interfaz radio para una red UMTS con funcionalidad HSDPA.

En comparación con la arquitectura de *Release 99*, el desplazamiento del planificador de paquetes (*scheduler*) desde la RNC hasta el Nodo B es el cambio más notable. La motivación de este cambio es la necesidad de información reciente sobre el estado del canal radio por parte de los mecanismos de adaptación al canal (*link adaptation*) y del propio *scheduler*, a fin de poder realizar un seguimiento instantáneo de las condiciones radio de cada usuario. Ahora, al tomarse las decisiones de *scheduling* en la capa MAC-hs del Nodo B, se requieren nuevos buffers en el Nodo B para almacenar los datos de cada usuario que esperan ser transmitidos a través de la interfaz radio.

La distribución de la capacidad de almacenamiento entre la RNC y el Nodo B implica la necesidad de un mecanismo de

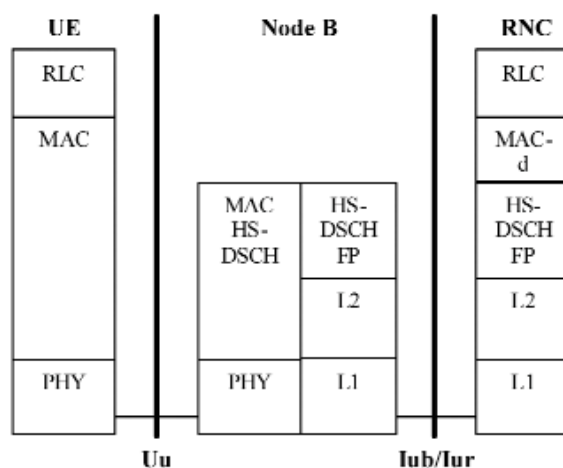


Fig. 1. Estructura de protocolos para la interfaz radio de HSDPA.

control de flujo que regule la transferencia de datos (tramas RLC) desde la RNC al Nodo B. El objetivo de este mecanismo es mantener los buffers del Nodo B a un nivel tal que, por un lado, la capacidad del canal radio no sea malgastada y, por otro, el retardo de encolamiento en el Nodo B no sea demasiado alto. Por otro lado, dichos buffers no deben estar demasiado llenos ya que, en caso de producirse un handover (cambio de celda/Nodo B por parte del terminal móvil), los datos que estaban almacenados en el Nodo B inicial son eliminados y la RNC debe volver a transmitirlos hacia el nuevo Nodo B que controle ahora al usuario.

El mecanismo de control de flujo recogido en las especificaciones del 3GPP para el canal HS-DSCH [4] es el mismo que se propuso para los canales dedicados (*Dedicated Channels*, DCH) en la *Release '99* y se conoce como un sistema basado en créditos. Sin embargo, las especificaciones básicamente se limitan a definir los formatos de las tramas de señalización *HS-DSCH Capacity Request* y *HS-DSCH Capacity Allocation*, y de datos *HS-DSCH Data Frames* que se utilizan durante el proceso [4]. Por último, también se especifica que dicho control de flujo se debe realizar de forma independiente para cada flujo de datos con el fin de proporcionar un trato equitativo a todos los flujos.

Cumpliendo las directrices indicadas por el 3GPP, un esquema que se utiliza habitualmente consiste en observar y controlar directamente el nivel del buffer en el Nodo B para

cada flujo de datos de forma que el tiempo de encolamiento no supere un valor previamente definido [1], [5]. Precisamente esta idea intuitiva es la que se desarrolla y estudia analíticamente en este artículo. Para ello se plantea el control de flujo de HSDPA como un problema de optimización cuadrática que se resuelve mediante técnicas de programación dinámica (*Dynamic Programming*, DP) [2].

El resto del artículo está organizado de la siguiente forma. En la sección 2 se describirá el modelo matemático utilizado para caracterizar el sistema de control de flujo de HSDPA y se resolverá el problema de optimización derivado de dicho modelo matemático. Por último, la sección 3 recoge las conclusiones y líneas futuras de este trabajo.

II. CONTROL DE FLUJO EN HSDPA

A. Modelo del sistema

El escenario considerado para realizar nuestro estudio es una celda 3G con funcionalidad HSDPA (ver figura 2), donde varios usuarios (*User Equipments*, UEs) se conectan al Nodo B a través del canal *High Speed Downlink Shared Channel* (HS-DSCH) en sentido *downlink* y mediante un canal dedicado (DCH) en sentido *uplink*. La interfaz Iub, la cual conecta el Nodo B y la RNC, se supone de capacidad constante para el tráfico HSDPA. Asimismo, se considera que la RNC se conecta directamente a Internet a través de un enlace de capacidad constante. En una situación real, la capacidad de la Iub disponible para HSDPA es variable y depende del tráfico de los canales dedicados pero este hecho provoca picos de retardo y retardos impredecibles que dificultaría aislar la influencia de este efecto en las prestaciones de los distintos esquemas de control de flujo. El procedimiento encargado de controlar estos cambios en la capacidad de la Iub es el control de congestión (fuera del ámbito de estudio de este artículo). En futuras investigaciones incorporaremos dicho mecanismo a nuestro análisis a fin de estudiar las interacciones entre ambos controles (flujo y congestión).

Por simplicidad consideraremos sólo un flujo MAC-d por usuario, es decir, una sola conexión de datos por usuario. Cada uno de estos flujos está asociado a una cola de prioridad del Nodo B, que guarda los datos que están a punto de ser transmitidos por la interfaz radio, y a un buffer en la RNC donde llega la información de dicho flujo desde Internet. Por tanto, la función del control de flujo consistirá en determinar la cantidad de información a transmitir para cada conexión de datos desde la RNC al Nodo B en un periodo de tiempo de longitud fija (cada conexión de datos tiene su propio proceso de control de flujo independiente del resto, tal y como describe el 3GPP en [4]). Dicho periodo es lo que comúnmente llamamos time-slot. Con el fin de obtener matemáticamente una política que determine las decisiones del control de flujo de HSDPA, cada conexión de datos entre la RNC y el Nodo B se modela como un sistema lineal en tiempo discreto. Cada time-slot se corresponde con la unidad de tiempo mínima en nuestro sistema en tiempo discreto, T_u .

Denotaremos por $q_i[n]$ la longitud en tramas RLC de la cola del Nodo B para el usuario i al inicio del time-slot n , y por $r_i[n]$ la tasa de transferencia de tramas RLC que son transmitidas por primera vez a través del canal radio para el usuario i durante el time-slot n (tasa efectiva). Sea $v_i[n]$ el

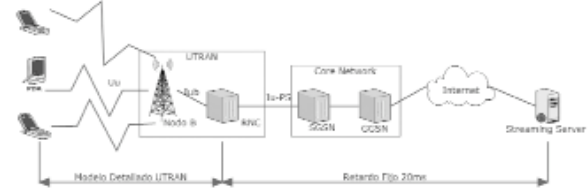


Fig. 2. Arquitectura de la red HSDPA considerada.

número de *créditos*/tramas RLC concedidas por la RNC al usuario i para el time-slot n . La evolución de la cola en el Nodo B para cada usuario i viene dada por la ecuación lineal:

$$q_i[n+1] = q_i[n] + v_i[n] - r_i[n] \cdot T_u \quad (1)$$

Dada la variabilidad de la calidad del canal radio, la tasa de transmisión efectiva $r_i[n]$ puede cambiar de manera impredecible siendo desconocido su valor al inicio del time-slot n . En nuestro modelo matemático la representaremos como:

$$r_i[n] = \bar{r}_i[n] + \xi_i[n] \quad (2)$$

dónde $\bar{r}_i[n]$ es el valor esperado de $r_i[n]$ y $\xi_i[n]$ es una variable aleatoria de media cero y varianza finita que consideraremos como un error en la estimación de $r_i[n]$.

B. Análisis Matemático

Genéricamente, la mayor parte de algoritmos diseñados para llevar a cabo el control de flujo en HSDPA regulan la transferencia de datos desde la RNC hasta el Nodo B con el objetivo de conseguir un tiempo de encolamiento predefinido T_w para los buffers del Nodo B $q_i[n]$ [1], [5]. En consecuencia, el control de flujo trata de mantener el nivel del buffer para cada flujo a un valor objetivo $Q_i[n]$:

$$Q_i[n] = r_i[n] \cdot T_w[n] \quad (3)$$

Para cada usuario i , cada time-slot el control de flujo trata de compensar la diferencia entre el nivel deseado $Q_i[n]$ y el nivel real $q_i[n]$. Hasta la fecha, los artículos que abordan este problema muestran directamente las expresiones que lo resuelven pero no explican de donde vienen dichos resultados. Sin embargo, en este artículo se formula el problema de control de flujo en HSDPA como un problema de optimización cuadrática. Así, la función objetivo a minimizar para cada usuario es:

$$E\left\{\sum_{n=0}^K [(q_i[n] - Q_i[n])^2 + (v_i[n] - r_i[n] \cdot T_u)^2]\right\} \quad (4)$$

donde el primer término representa la penalización por desviarse del valor objetivo de la cola del Nodo B y el segundo término es una medida de la calidad con la que la tasa de transferencia de la RNC (*créditos*) sigue la tasa efectiva del canal. K es el número de etapas o time-slots sobre los que se minimiza.

Introduciendo los siguientes cambios de variable:

$$\begin{aligned} x_i[n] &:= q_i[n] - Q_i[n] \\ u_i[n] &:= v_i[n] - \bar{r}_i[n] \cdot T_u \end{aligned} \quad (5)$$

y usando notación vectorial

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_n &= (x_1[n], \dots, x_M[n])' \\ \mathbf{u}_n &= (u_1[n], \dots, u_M[n])' \\ \mathbf{w}_n &= (\xi_1[n] \cdot T_u, \dots, \xi_M[n] \cdot T_u)' \end{aligned} \quad (6)$$

la ecuación del sistema (1) con M usuarios en la celda se puede expresar como:

$$\mathbf{x}_{n+1} = \mathbf{A}_n \mathbf{x}_n + \mathbf{B}_n \mathbf{u}_n + \mathbf{w}_n = \mathbf{x}_n + \mathbf{u}_n + \mathbf{w}_n \quad (7)$$

donde \mathbf{x}_n es el vector de estados, \mathbf{u}_n es el vector de control y \mathbf{w}_n es el vector de perturbaciones. En nuestro caso, tanto \mathbf{A}_n como \mathbf{B}_n son matrices identidad de orden $M \times M$.

Por su parte la función de coste o función objetivo (4) se puede expresar ahora de la siguiente forma:

$$E \left\{ \mathbf{x}_K' \mathbf{Q}_K \mathbf{x}_K + \sum_{n=0}^{K-1} (\mathbf{x}_n' \mathbf{Q}_n \mathbf{x}_n + \mathbf{u}_n' \mathbf{R}_n \mathbf{u}_n) \right\} - E \left\{ \mathbf{x}_K^2 + \sum_{n=0}^{K-1} (\mathbf{x}_n^2 + \mathbf{u}_n^2) \right\} \quad (8)$$

donde las matrices \mathbf{Q}_n y \mathbf{R}_n son matrices identidad de orden $M \times M$. Las primeras representan el coste asociado a la ocupación de los buffers y las segundas el coste asociado a los vectores de control. K es el número de etapas sobre las que se desea optimizar el sistema. En nuestro caso, estamos interesados en reducir los niveles de los buffers al final de cada time-slot y, por tanto, minimizaremos sobre una sola etapa.

La minimización de la función de coste se llevará a cabo mediante programación dinámica aproximada. Básicamente lo que haremos es ir calculando etapa a etapa cuál es la combinación de controles que consigue minimizar el estado siguiente (nivel buffers), empezando en orden inverso desde la última etapa ($n+1$ en nuestro caso) hasta llegar a la etapa inicial. Así, en la etapa n , nuestro objetivo será minimizar el coste del control \mathbf{u}_n y del estado \mathbf{x}_{n+1} . El coste de la última etapa sería:

$$J_{n+1}(\mathbf{x}_{n+1}) = \mathbf{x}_{n+1}^2 \quad (9)$$

El objetivo es encontrar el vector de control \mathbf{u}_n con el que se obtenga el mínimo coste desde la etapa n hasta la $n+1$. En la etapa n , el coste vendría dado por:

$$J_n(\mathbf{x}_n) = \min_{\mathbf{u}_n} E \left\{ \mathbf{x}_n^2 + \mathbf{u}_n^2 + J_{n+1}(\mathbf{x}_{n+1}) \right\} \quad (10)$$

aplicando (9) y sustituyendo \mathbf{x}_{n+1} por su valor en (7) obtenemos:

$$J_n(\mathbf{x}_n) = \min_{\mathbf{u}_n} \left\{ 2\mathbf{x}_n^2 + E \left\{ \mathbf{w}_n^2 + 2\mathbf{x}_n' \mathbf{w}_n \right\} + \min_{\mathbf{u}_n} \left\{ 2\mathbf{x}_n' \mathbf{u}_n + 2\mathbf{u}_n^2 + E \left\{ 2\mathbf{w}_n' \mathbf{u}_n \right\} \right\} \right\} \quad (11)$$

Teniendo en cuenta que la esperanza de \mathbf{w}_n es cero (sus componentes $\xi_i[n]$ son variables aleatorias de media cero) el último término de la expresión anterior desaparece. El vector de control que minimiza $J_n(\mathbf{x}_n)$ puede obtenerse directamente derivando (11) con respecto a \mathbf{u}_n e igualando el resultado a cero, obteniendo la siguiente ley de control:

$$\mathbf{u}_n = -\frac{1}{2} \mathbf{x}_n \quad (12)$$

Deshaciendo los cambios de variable realizados en (5), obtenemos el número de créditos óptimo que debe enviar la RNC para cada flujo i :

$$v_i[n] = -\frac{1}{2} (q_i[n] - Q_i[n]) + r_i[n] \cdot T_u \quad (13)$$

Curiosamente, en [1] se propone esta misma expresión desde un planteamiento intuitivo.

III. CONCLUSIONES

En este artículo se ha abordado el problema del control de flujo de HSDPA desde una perspectiva diferente a los trabajos realizados hasta la fecha. Se ha planteado como un problema de optimización cuadrática para cuya resolución se ha hecho uso del método de programación dinámica.

En un futuro se pretende extender este análisis matemático al control de congestión del Iub con el fin de obtener un algoritmo capaz de desempeñar las dos funcionalidades: control de flujo y de congestión del Iub.

AGRADECIMIENTOS

Gaspar Pedreño agradece el apoyo del Ministerio de Educación y Ciencia a través de la beca FPU AP2006-01568.

REFERENCES

- [1] *Impact of Iub Flow Control on HSDPA System Performance*, Marc C. Necker, Andreas Weber, 2005. 2nd International Symposium on Wireless Communication Systems
- [2] *Dynamic Programming and Optimal Control, Vol. 1*, Dimitri P. Bertsekas, Prentice Hall, USA, 1987
- [3] 3GPP 25.308 "UTRA High Speed Downlink Packet Access (HSDPA); Overall description"
- [4] 3GPP 25.877 "HSDPA - Iub/Iur Protocol Aspects"
- [5] *Providing congestion control in the Iub Transport Network for HSDPA*, Szilveszter Nadas, Sandor Racz, Zoltan Nagy and Sandor Molnar, Globecom 2007.

Respuesta termorregulatoria de usuario en la banda de GSM 1800

M. A. García-Fernández^{#1}, J. F. Valenzuela-Valdés^{#2}, D. Sánchez-Hernández^{#3}

[#]Departamento de Tecnologías de la Información y Comunicaciones

Universidad Politécnica de Cartagena, Campus Muralla del Mar, E-30202 Cartagena Spain

Teléfono: 968 32 5376 Fax: 968 32 5973

E-mail: garciafernandez.ma@upct.es

Resumen. En esta contribución, un plano coronal de cabeza humana, extraído del Proyecto Humano Visible (PHV), es expuesto a 1 W de potencia radiada por un dipolo de media onda a una frecuencia de 1800 MHz. La combinación mediante software propio de las ecuaciones de Maxwell y de un modelo termorregulatorio humano proporciona tanto la TAE (Tasa de Absorción Específica) como los incrementos de temperatura asociados a la exposición electromagnética, para todos los tejidos del modelo a lo largo de la dirección de propagación, para varias distancias entre el dipolo y la cabeza humana. Se presenta un importante efecto de adaptación entre el dipolo y la cabeza humana, así como al cráneo como protector del encéfalo ante tensiones térmicas debidas a exposición a campo EM. Como resultado del estudio, se podrían derivar restricciones básicas más precisas combinando los límites de TAE con la respuesta térmica, recientemente disponible, debida a la exposición a campo EM.

1 Introducción

En dosimetría electromagnética, el fundamento para derivar las restricciones básicas y sus márgenes de seguridad asociados no está completamente estandarizado y se emplean diversos valores dependiendo del efecto térmico considerado para derivar la restricción básica [1]. Los límites de seguridad internacionales frente exposición a campo electromagnético (EM) proporcionan niveles de referencia expresados en términos de intensidad de campo EM, que se evalúan en ausencia de una persona. Se derivan usando condiciones de peor caso de acoplo electromagnético, pero también de exposición a onda plana y continua, que se limita a situaciones de campo lejano. En esta contribución se ha utilizado como elemento radiante un dipolo de media onda a una frecuencia de 1800 MHz, al que se le entrega una potencia tal que se logre una potencia radiada al espacio libre (no absorbida por el modelo) de 1 W, con el objetivo de mantener una determinada calidad de servicio. Este nivel de potencia fue escogido debido a que es el límite de potencia para terminales móviles GSM-1800. El dipolo sirve de fuente de exposición a un plano coronal de cabeza humana extraído del Proyecto Humano Visible (PHV), con el Punto de Referencia del Oído (PRO) alineado con el centro del dipolo. La posibilidad de poder derivar consecuencias térmicas de la exposición a campo electromagnético (EM) ha salido a la luz sólo recientemente con la combinación de las diversas ecuaciones necesarias y la capacidad de potentes ordenadores. La combinación mediante software propio de las ecuaciones de Maxwell y de un modelo termorregulatorio humano proporciona tanto la Tasa de Absorción Específica (TAE, del inglés *Specific Absorption Rate*, SAR) como los incrementos de temperatura asociados a la exposición electromagnética, además de servir para evaluar la

relación entre ambos. Como en [2], se ha encontrado una distancia crítica a la cual el modelo de cabeza humana adapta su impedancia con la del dipolo empleado como elemento radiante, causando una considerable TAE e incremento térmico. Otros autores han encontrado también la respuesta térmica a exposición a campo EM como un método adecuado y complementario a los existentes límites de seguridad [3]. Debido a que un incremento de temperatura superior a 1 °C en cualquier parte del cerebro provocaría un golpe de calor, y un incremento de 0.2-0.3 °C en la región del hipotálamo alteraría la respuesta termorregulatoria, con los resultados presentados en esta contribución queda claro que la adopción de una restricción básica que implique directamente el incremento de temperatura (con niveles de referencia distintos para las diversas partes del cuerpo de acuerdo con sus sensibilidades al calor), en combinación con los límites basados en la TAE ya existentes, podría ser más precisa para el escenario de exposición del ser humano a campo EM.

2 Métodos y Modelos

El software propio fue preparado en combinación con los algoritmos de resolución de ecuaciones diferenciales parciales de MATLAB®, y calcula las componentes del campo EM en cualquier modelo bidimensional, teniendo como fuente un dipolo de cualquier longitud. Debido a las características 2D de los algoritmos de MATLAB®, para resolver el campo EM se emplearon coordenadas cilíndricas y simetría en ϕ , obteniendo por separado las componentes E_ϕ y E_z , siendo E_ϕ despreciable al ser la fuente de radiación un dipolo. El modelo de cabeza humana desarrollado en esta investigación representa un plano coronal de cabeza humana, extraído del Proyecto Humano Visible (PHV), incluyendo al Punto de Referencia del Oído (PRO), el cual está a una

distancia lateral de 15 mm del Trago (entrada al canal auditivo) [4], tal y como se muestra en la Fig. 1. Se estableció el centro del dipolo como origen de coordenadas, y el PRO fue alineado de manera que se enfocara en él la radiación del dipolo.

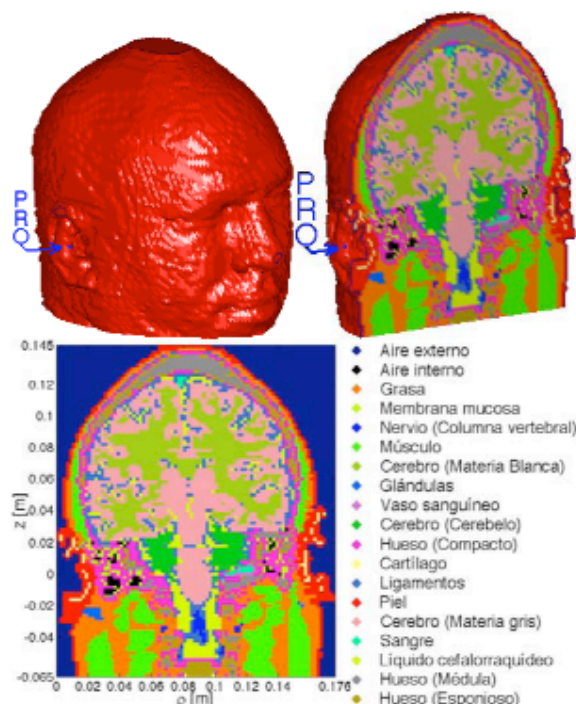


Fig. 1. Modelo de cabeza humana del Proyecto Humano Visible (arriba-izquierda), plano coronal conteniendo al PRO y leyenda (abajo-derecha).

La potencia radiada al espacio libre (no absorbida por el modelo) fue establecida igual a 1 W, variando la potencia entregada en función de la adaptación de impedancias. Las propiedades eléctricas y térmicas de los materiales empleados se extrajeron de la literatura, y algunas se muestran en la Tabla 1 [5]. Tras calcular la TAE, se evaluó el incremento térmico para todos los tejidos resolviendo la ecuación biocalor modificada [6],

$$\rho \cdot c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k_T \nabla T) + \rho SAR + A_0 + B(T_b - T) \quad (1)$$

donde T_b es la temperatura sanguínea, tomada igual a 36.5 °C. Las condiciones de contorno fueron establecidas mediante un coeficiente de transferencia de calor convectivo (h_T) de 10.5 W/(m² °C) y una temperatura ambiente de 25 °C.

$$\hat{n} \cdot k_T \cdot \nabla T = h_T \cdot (T_r - T) \quad (2)$$

En esta contribución, las condiciones térmicas se mantienen bajo el ajuste vasomotor, es decir, bajo la temperatura crítica inferior [7]. De esta forma, no se evalúa vaporización y una exposición electromagnética severa está fuera del alcance de esta contribución, es decir, se evita la transferencia de masa y sus mecanismos de transferencia de calor asociados.

3 Resultados Simulados

A pesar del objetivo de las directivas de seguridad internacional de proporcionar recomendaciones a los gobiernos para evitar tensión térmica de cuerpo completo y excesivo calentamiento local de tejidos, los límites de seguridad actuales se derivan en términos de TAE promediada, esto es, potencia absorbida por el tejido por unidad de masa y valores de campo incidente, como una manera de prevenir posibles riesgos para la salud debido a incrementos térmicos en zonas críticas. Como ejemplo, el hipotálamo no debe sobrepasar un incremento térmico de 0.2-0.3 °C [8] o se alteraría la respuesta termorregulatoria. En las simulaciones se evalúa la relación entre la configuración de exposición EM y las implicaciones térmicas. La variación de la distancia dipolo-cabeza produce algunos efectos de adaptación de impedancia [2]. Para el plano seleccionado, la distancia de $\lambda/7$ provocó la mejor adaptación, con la mayor absorción por la cabeza humana. De hecho, se requirió entregar 33 W de potencia al dipolo para mantener constante la preseleccionada potencia radiada al espacio libre de 1 W. A pesar de que sistemas comerciales GSM-UMTS limitan la potencia máxima de salida, algunos como TETRA pueden no limitarla, y por tanto, es interesante analizar en profundidad los resultados.

Tejido	ϵ_r	σ (S/m)	ρ Densidad (Kg/m ³)	c_p Calor específico (J/Kg·°C)	k_T Conductividad térmica (W/m·°C)	A_0 Producción de calor metabólico (W/m ³)	B Término asociado al flujo sanguíneo (W/m ³ ·°C)
Cerebro (Cerebelo)	46.11	1.709	1038	3687	0.57	10040	56490
Cerebro (Materia Blanca)	37.01	0.915	1038	3600	0.50	2820	15890
Cerebro (Materia Gris)	50.08	1.391	1038	3687	0.57	10040	56490
Hueso (Poroso)	19.34	0.588	1920	2150	0.30	2510	14120
Hueso (Compacto)	11.78	0.275	1990	1650	0.30	0	0
Hueso (Médula)	5.37	0.069	1040	2700	0.22	5020	28230
Sangre	59.37	2.044	1058	3840	0.49	0	0
Vaso sanguíneo	43.34	1.066	1040	3553	0.46	1600	9000

Tabla 1. Propiedades dieléctricas, físicas y térmicas de tejidos del modelo empleado en las simulaciones.

En la Fig. 2 se representa el efecto de adaptación. Si tenemos un sistema en el que se proporciona una determinada calidad de servicio, sería interesante observar la TAE normalizada respecto de las potencias entregada y radiada al espacio libre (no absorbida por el modelo). Esto se representa en las Fig. 3 y 4. El efecto de adaptación de impedancia se observa claramente en la Fig. 3, donde la TAE de pico normalizada respecto a la potencia entregada tiene un mínimo para una distancia dipolo-cabeza de aproximadamente $\lambda/7$. Este fenómeno es menos abrupto si la normalización se realiza respecto de la potencia radiada al espacio libre (Fig. 4), donde se obtienen valores mayores de TAE de pico máxima.

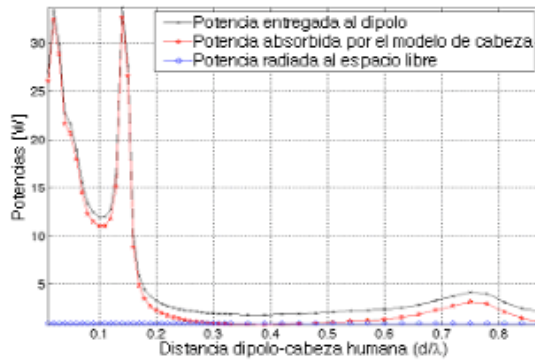


Fig. 2. Potencias entregada, absorbida y radiada al espacio en función de la distancia dipolo-cabeza.



Fig. 3. TAE de pico en el cerebro (materia gris) normalizada respecto de la potencia entregada.

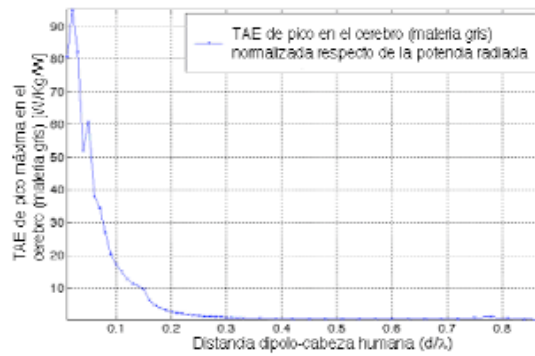


Fig. 4. TAE de pico en el cerebro (materia gris) normalizada respecto de la potencia radiada.

Los resultados de TAE e incremento térmico para una distancia dipolo-cabeza de 10 mm se muestran en la Tabla 2 y se representan en la Fig. 5. Se necesitó entregar una potencia de 19 W para mantener la potencia radiada (no absorbida) igual a 1 W. Los resultados se presentan para los tejidos encontrados a lo largo de una línea horizontal perpendicular al modelo de cabeza desde el PRO, como en [2]. Mientras que la TAE normalizada respecto de la potencia entregada siempre se mantiene por debajo de los límites de seguridad, se pueden encontrar algunos incrementos térmicos mayores que otros tejidos, debido a su baja conductividad térmica, pero esto previene que el calor sea transferido de manera efectiva al cerebro, donde podría ser potencialmente peligroso.

4 Conclusiones

Aunque el modelo desarrollado en esta contribución es bidimensional y por tanto las conclusiones aquí derivadas no pueden ser extendidas directamente a modelos tridimensionales más complicados, la combinación de la

Tejido	TAE promediada por tejido, normalizada respecto de la potencia entregada	ΔT de pico tras 6 min.	ΔT de pico tras 30 min.
Cerebro (Cerebelo)	0.005415	0.047672	0.058327
Cerebro (Materia Blanca)	0.016916	0.708660	1.080720
Cerebro (Materia Gris)	0.024830	1.663100	2.927550
Hueso (Poroso)	0.003367	1.023300	2.503340
Hueso (Cortical)	0.006274	3.562570	6.403150
Hueso (Médula)	0.000546	0.790331	2.072100
Piel	0.294709	10.742800	13.378900
Sangre	0.000200	0.000372	0.000903
Vaso sanguíneo	0.000038	0.000175	0.000338

Tabla 2. TAE e incremento térmico

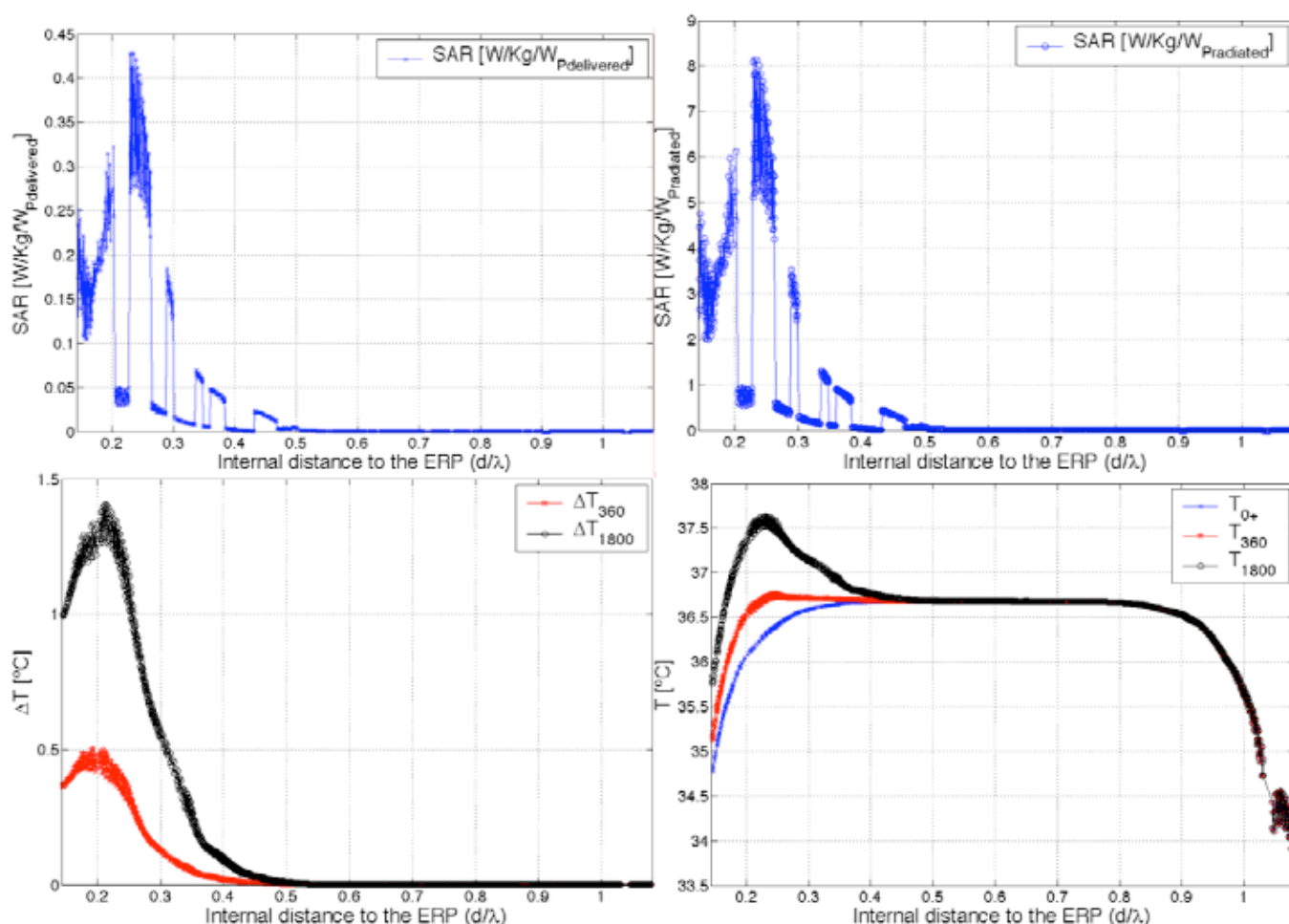


Fig. 5. TAE normalizada respecto de la potencia entregada y radiada al espacio libre (no absorbida por el usuario), incremento térmico tras 6 min. y 30 min., y temperatura a lo largo de los tejidos desde el PRO.

exposición a campo electromagnético con la respuesta termorregulatoria humana ha proporcionado algunos resultados interesantes. Se ha reafirmado la naturaleza protectora del cráneo, y se han encontrado algunos incrementos térmicos por encima de 1 °C en tejidos del cerebro. Todavía hay muchos otros factores a tener en cuenta en el modelo desarrollado, tales como sudoración, respiración, pérdidas de calor variables en los pulmones, capilaridad, vasodilatación, flujo sanguíneo o metabolismo variables, vestimenta, ritmo cardíaco o incluso alteraciones en la propia respuesta termorregulatoria debidas a que se incremente la temperatura en el hipotálamo por la energía de RF depositada, etc. Sin embargo, con los potentes recursos computacionales disponibles hoy no es arriesgado concebir la posibilidad de reducir las incertidumbres científicas actuales respecto a exposición humana a campos EM, ya reconocidos, mediante el empleo de los factores de protección y escenarios de peor caso de acoplo electromagnético, cuando se derivan los límites de seguridad, mediante

el uso de la respuesta térmica humana. La adopción de una restricción básica que implique directamente el incremento de temperatura (con niveles de referencia distintos para las diversas partes del cuerpo de acuerdo con sus sensibilidades al calor), en combinación con los límites basados en la TAE ya existentes, podría ser más precisa para el escenario de exposición del ser humano a campo EM. El modelo descrito puede ser útil para operaciones de cirugía relativamente nuevas como implantes para estimulación cerebral profunda (ECP, del inglés *Deep Brain Stimulation*, DBS) donde los electrodos pueden provocar calentamiento en los tejidos si se realizaran exploraciones mediante resonancia magnética para evaluar las enfermedades de Parkinson o Alzheimer. También puede ser útil para la correcta evaluación de respuestas del cuerpo a marcapasos o a cardioversores desfibriladores implantables (CDI) durante la pulsación de RF, o para la evaluación de la respuesta de neuroestimuladores o válvulas hidrocefálicas a la exposición a teléfonos móviles.

Agradecimientos

Esta investigación ha sido financiada parcialmente por la Fundación Séneca, Agencia de Ciencia y Tecnología de la Región de Murcia, a través de una ayuda del Programa Séneca.

Referencias

- [1] Lin, J.C., "Safety standards for human exposure to radio frequency radiation and their biological rationale", *IEE Microwave magazine*, pp. 22-26, Dec. 2003.
- [2] Christ, A. et al., "The dependence of electromagnetic far-field absorption on body tissue composition in the frequency range from 300 MHz to 6 GHz", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 54, no.5, pp. 2188-2195, 2006.
- [3] Bernardi, P. et al., "SAR distribution and temperature increase in an anatomical model of the human eye exposed to the field radiated by the user antenna in a wireless LAN", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 46, no. 12, pp. 2074-2081, 1998.
- [4] IEC 62209-1, "Human exposure to radio frequency fields from hand-held and body-mounted wireless communication devices – Human models, instrumentation, and procedures – Part 1: Procedure to determine the specific absorption rate (SAR) for hand-held devices used in close proximity to the ear (frequency range of 300 MHz to 3 GHz)", 2005.
- [5] Gabriel, C., "Compilation of the dielectric properties of body tissues at RF and microwave frequencies", Brooks Air Force, Brooks AFB, TX, Tech. Rep. AL/OE-TR-1996-0037, 1996.
- [6] Pennes, H.H., "Analysis of Tissue and Arterial Blood Temperature in the Resting Human Forearm", *J. of Applied Physiology*, Vol. 1, pp. 93-102, 1948.
- [7] Adair, E.R., Kelleher, S.A., Mack, G.W. and Morocco, T.S., "Thermophysiological responses of human volunteers during controlled whole-body radio frequency exposure at 450 MHz", *Bioelectromagnetics*, vol. 19, pp. 232-245, 1998.
- [8] Ghandi, O.P., Lazzi, G., Furse, C.M., "Electromagnetic Absorption in the Human Head and Neck for Mobile Telephones at 835 and 1900 MHz", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 44, no. 10, pp. 1865-1873, 1996.
- [9] García-Fernández, M. A., Valenzuela-Valdés, J., Martínez-González, A. M., Sánchez-Hernández, D., "Thermoregulatory Response to Electromagnetic Plane-Wave Exposure at 900 MHz", *Proceedings of The European Conference on Antennas and Propagation: EuCAP 2006 (ESA SP-626)*. 6-10 November 2006, Nice, France. Editors: H. Lacoste & L. Ouweland. Published on CDROM., p.657.1, 10/2006.

Un Lenguaje específico de dominio para el desarrollo de aplicaciones domóticas

M^a Francisca Rosique, Manuel Jiménez, Pedro Sánchez, Bárbara Álvarez, Andrés Iborra
 División de Sistemas e Ingeniería Electrónica (DSIE)
 Universidad Politécnica de Cartagena, 30202 Cartagena, España
paqui.rosique@upct.es | manuel.jimenez@upct.es | pedro.sanchez@upct.es

Resumen. Los sistemas domóticos han surgido como uno de los campos de mayor interés en el ámbito de la ingeniería dada la actual demanda de los sistemas de la información en la sociedad. Actualmente el desarrollo de estos sistemas se realiza en un espacio muy cercano a la solución, de forma dependiente de la plataforma y a un bajo nivel de abstracción. En este sentido, el lenguaje específico de dominio (DSL) que se presenta en este trabajo facilita la captura de requisitos propios de un sistema domótico de forma visual e intuitiva.

1. Introducción

Los lenguajes visuales transmiten mayor información por unidad de expresión, ya que los elementos gráficos ayudan al entendimiento, son fáciles de identificar y recordar y son lenguajes entendibles de forma universal [1].

Para el caso concreto del dominio domótico sería deseable disponer de un lenguaje visual que a la vez sea específico para este dominio. La definición de este lenguaje tiene por objetivo ayudar a los diseñadores a describir los sistemas domóticos utilizando únicamente conceptos del dominio. En este sentido, el DSL que se presenta en este trabajo facilita la captura de requisitos propios de un sistema domótico de forma visual e intuitiva. De esta forma, los usuarios ven facilitada la posibilidad de expresar y entender su conocimiento y experiencia en el dominio. Por esta razón la primera premisa es la de disponer de una riqueza semántica importante para la visualización del conocimiento, pero a la vez concisa y común a las distintas plataformas. Antes de entrar en detalles es necesario exponer los principales conceptos con los que se trabaja en el dominio domótico y que deben tenerse en cuenta a la hora de crear el DSL.

En cualquier sistema domótico [2] existe una serie de elementos (que denominamos "Unidades Funcionales") que aparecen en todas las tecnologías y estándares domóticos. Se diferencian en la arquitectura, protocolos utilizados o módulos disponibles, pero son iguales en cuanto funcionalidad. Con el fin de promover la reutilización de estas unidades funcionales y evitar tener que definir múltiples veces la misma unidad para cada aplicación (incluso varias veces dentro de una misma aplicación), se ha optado por utilizar un Catálogo de unidades funcionales reutilizable, de manera que una vez definido dicho catálogo éste se pueda utilizar en cualquier aplicación y sólo sea necesario obtener ejemplares de dicho catálogo. Estas unidades funcionales a su vez disponen de unos Servicios gracias a los cuales las unidades

podrán interactuar con otras unidades. Muchos de estos servicios se repiten entre las unidades funcionales, de manera que se ha creado un Catálogo de Servicios con unas Definiciones de Servicios que puedan ser reutilizadas en cualquier unidad funcional.

Por esta razón es conveniente distinguir dos vistas del DSL, una para el desarrollo de aplicaciones con un desarrollador de aplicaciones como usuario (conoce el dominio pero no tiene que ser experto) y una segunda vista para desarrollar y realizar posibles actualizaciones del catálogo, donde el usuario deber ser un experto en el dominio.

1.1 Vista Catálogo del DSL

El DSL permite al experto en el dominio modelar el catálogo de unidades funcionales y servicios. Este catálogo será utilizado posteriormente para el desarrollo de aplicaciones domóticas, sin que sea necesario definir cada una de las unidades funcionales y sus servicios cada vez que se desarrolle una nueva aplicación.

Las primitivas disponibles para modelar un catálogo se describen en la parte superior de la Tabla 1.

Un catálogo incluye categorías y unidades funcionales. Las categorías forman una jerarquía estática definida siguiendo una notación cercana al dominio domótico. En el catálogo desarrollado se realizan dos agrupaciones principales, una para los elementos "Final-Passive" (aquellos puramente hardware) y otra agrupación para los "Controllers" que son elementos que aportan una funcionalidad configurable por software. En un segundo nivel se distinguen entre elementos de entrada, salida o elementos de entrada/salida.

La actualización y el incremento de dicho catálogo se centra en la incorporación de nuevas definiciones de unidades funcionales dentro de las categorías existentes.

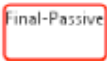

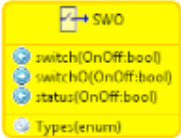
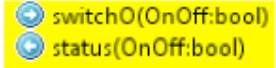


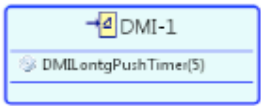
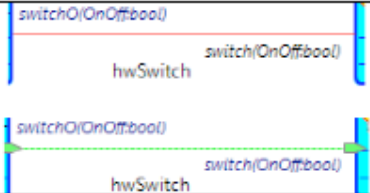

Representación gráfica y descripción de las primitivas de la vista Catálogo	
	Categoría: Especialización de un elemento del catálogo.
	Enlaces entre categorías (verde) y enlaces entre unidades funcionales y categorías (azul).
	Definición de Unidad Funcional: es el mínimo elemento en el que puede dividirse un dispositivo domótico. Incluye un icono, un nombre y los servicios provistos e implementados..
	Servicio: Una definición de servicio tiene una firma que incluye el nombre del servicio y sus argumentos. El servicio indica si es provisto o requerido (flecha izq o drcha) e indica si es un servicio hardware o no (flecha roja o azul). Un catálogo de servicios se usa para permitir la reutilización de los servicios.
	Definición de parámetro: indica el parámetro de una unidad funcional.
	Definición de escena: es una especialización de unidad funcional.
Representación gráfica y descripción de las primitivas de la vista Aplicación	
	Instancia de unidad funcional: incluye los parámetros y sus valores.
	Enlace entre unidades funcionales. Un enlace del tipo canal se muestra en rojo, el resto de enlaces se muestran con una línea discontinua verde. Estos enlaces tienen tres etiquetas con los nombres de los servicios involucrados en dicho enlace.
	Escena: contiene los pasos de escena que se ejecutarán. Un paso de escena muestra el servicio y el icono de la unidad funcional que participa en dicho paso de escena..

Tabla 1: Elementos de la vista Catálogo y Aplicación.

1.2 Vista Aplicación del DSL

Esta vista del DSL será utilizada por el desarrollador, encargado de definir/diseñar nuevas aplicaciones y sin tener que ser un experto en el dominio domótico. En este sentido, y gracias a la existencia del catálogo, la especificación de una aplicación domótica se realiza mediante:

- La instanciación de unidades funcionales que vienen definidas en el catálogo. Estas instancias de unidades funcionales deben ser configuradas añadiendo los valores necesarios a sus parámetros. Por ejemplo, para una unidad funcional definida como DMI que tiene un parámetro DMILongPushTime del tipo numérico se deberá indicar el valor que debe tomar dicho parámetro. Se podría dar un valor para que

pasados 3 segundos de pulsación detecte una pulsación larga y empiece a regular, en caso contrario realizará un conmutación.

- Los enlaces entre unidades funcionales. Mediante enlaces se puede indicar la forma en la que las unidades funcionales van a interactuar con el resto del sistema. Al realizar un enlace se indican los servicios que se interconectan. Estos enlaces pueden comportarse como enlaces de tipo canal en el caso de que una de las unidades funcionales involucradas sea pasiva de manera que se modela una conexión hardware o bien como un enlace normal.
- Escenas. Se puede configurar la ejecución de varios servicios de unidades funcionales de forma secuencial con una única acción. Por ejemplo se puede crear una escena

"Presentación" que se activa desde un pulsador y ejecuta una serie de servicios preestablecidos con antelación, por ejemplo bajar persiana, bajar intensidad de las luces y bajar pantalla de proyección.

Las primitivas disponibles en esta vista de aplicación son las que se muestran en la parte inferior de la Tabla 1.

2. Herramienta DSL y entorno de trabajo

El DSL se ejecuta en un entorno Eclipse, por lo que mantiene una estructura visual muy parecida con el resto de herramientas de Eclipse. En la figura 1 se pueden observar 3 zonas bien diferenciadas:

- **Área de dibujo:** zona de trabajo donde se arrastran las figuras desde la paleta para construir un modelo gráfico concreto, tanto para la vista de Catálogo como de Aplicaciones. También existe la opción de instanciar elementos desde un menú flotante en lugar de utilizar la paleta.
- **Paleta gráfica:** contiene las primitivas que se pueden arrastrar a la zona de dibujo.
- **Área de propiedades:** zona donde se visualizan y se modifican aquellas propiedades (atributos, parámetros, etc...) disponibles para la primitiva seleccionada. Para acceder a estas propiedades basta con seleccionar un elemento instanciado en la zona de dibujo. Las propiedades se muestran como campos editables o desplegables para facilitar un acceso rápido e intuitivo.

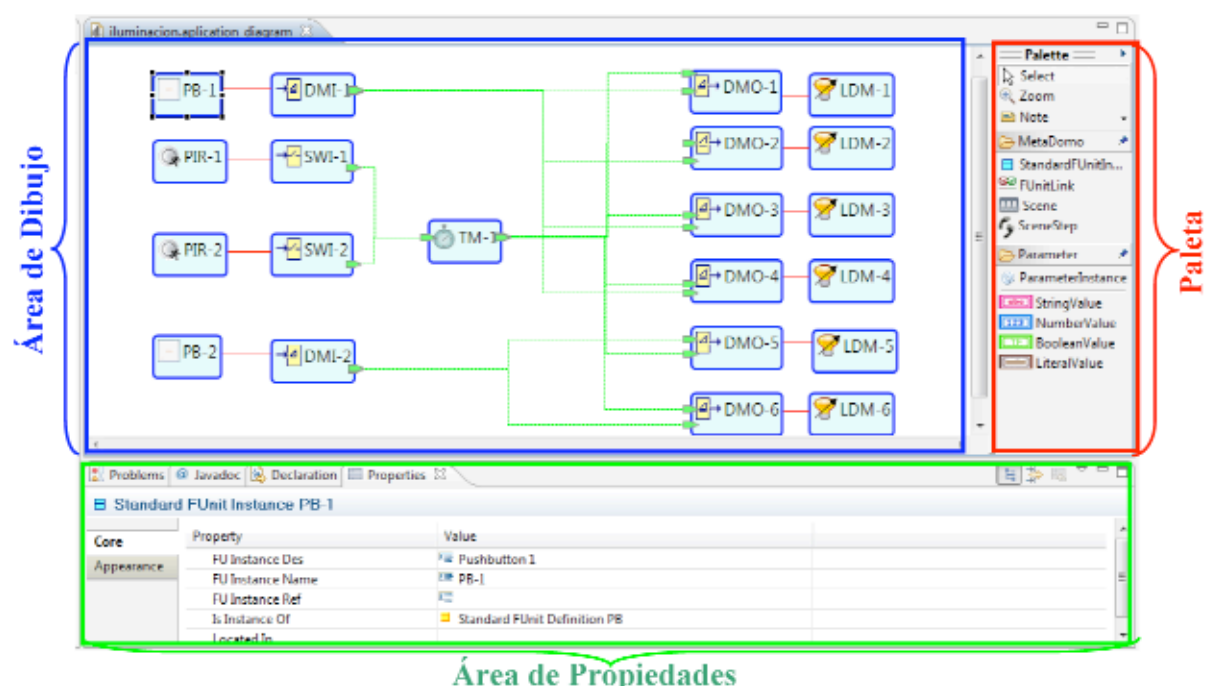


Figura 1: Vista Aplicación del DSL .

3. Conclusiones

La utilización del DSL propuesto en este documento proporciona al usuario (que ahora no tiene que ser experto) un entorno gráfico con un alto nivel de abstracción donde definir los requisitos del sistema con conceptos propios del dominio domótico. De este modo no se hace necesario comenzar el desarrollo analizando el software desde una perspectiva tecnológica.

El beneficio obtenido en el dominio domótico es doble: por un lado se ha conseguido separar en dos vistas complementarias el catálogo de dispositivos (presentes o futuros) y el diseño de nuevas aplicaciones, por otro, al integrarse esta propuesta en un marco de desarrollo dirigido por modelos [3], se obtiene la infraestructura conceptual más adecuada

para beneficiarse de las posibilidades relativas a: generación automática de código, verificación y validación de modelos, trazabilidad de requisitos, etc.

Referencias

- [1] J. Memik M., Lämmel R., "Special issue on domain-specific languages, Part II.", Journal for Computing and Information Technology, 10(1), 200 Miller, J.
- [2] J.L. Ryan, "Home Automation", Electronics & Communication Engineering Journal, Volume: 1 Issue:4, July-Aug. 1989, pp 185-192
- [3] Rosique, MF et al., "Desarrollo de aplicaciones domóticas dirigido por modelos". I Jornadas de Introducción a la investigación de la UPCT". pp 6-8, 2008.

Utilización de códigos Fountain para la transmisión fiable de datos en redes Homeplug AV

P.J. Piñero-Escuer, J.P. Muñoz-Gea, M.R. Liarte-López, J. Vidal-Panalés, J. Malgosa-Sanahuja.

Departamento Tecnologías de la Información y las Comunicaciones.

Universidad Politécnica de Cartagena.

Antiguo Cuartel de Antigonos (Campus muralla de mar), 30202 Cartagena.

Email: {pedrop.escuer, juanp.gea, rosa.liarte, jesus.vidal, josem.malgosa}@upct.es

Resumen. Los avances tecnológicos están provocando que cada vez sea más necesaria la instalación de redes de comunicaciones en el hogar o en la pequeña y mediana empresa (PYME). La tecnología de red que más interés está despertando en este tipo de entornos es la PLC (Power Line Communications, concretamente el estándar HomePlug AV), que utiliza la infraestructura de cableado de baja tensión del edificio para el intercambio de información. En este trabajo se presentan los códigos Fountain como un mecanismo eficaz para la transmisión fiable de datos en este tipo de redes.

1 Introducción

Cada vez es mayor la cantidad de dispositivos electrónicos ubicados en el hogar con facilidades de comunicación. Desde televisores y aparatos de radio interactivos hasta ordenadores o vídeo-consolas, sin olvidar algunos de los equipos de la línea blanca (neveras, etc); todos ellos compartiendo dinámicamente el acceso a Internet propio del hogar. Se avecina, por tanto, una era en la que las comunicaciones dentro del hogar (*in-home*) van a tener un papel relevante dentro de la denominada Sociedad de la Información. En la actualidad existen varias alternativas para el despliegue de redes *in-home*. Estas tecnologías se pueden dividir en tres categorías:

- **Inalámbricas:** Su principal ventaja es que el receptor tiene libertad para moverse manteniendo la conectividad. Las tecnologías inalámbricas más interesantes son las de la familia 802.11. Dentro de ella tenemos desde 802.11b, que proporciona una tasa de transmisión de 11Mbps, hasta 802.11n que puede proporcionar tasas hasta 300Mbps.
- **Cableadas:** Este tipo de redes presentan el inconveniente de que requieren el despliegue de una infraestructura de cableado estructurado para dar servicio de voz y datos que puede llegar a ser muy costoso.
- **No-new-wires:** Se denominan así las tecnologías que son capaces de aprovechar las infraestructuras de cableado ya existentes en el edificio para el despliegue de la red. Dentro de esta categoría tenemos las tecnologías que utilizan la línea telefónica, el cable coaxial del operador de CATV o la red eléctrica para el intercambio de datos. Esta última es la que más interés está despertando actualmente, ya que las otras dos presentan el inconveniente de que el número de puntos de conexión con la línea telefónica o con la red de cable es muy limitado.

No cabe duda que las dos tecnologías con mayor índice de penetración en entornos *in-home* son las redes inalámbricas y las PLC (Power Line Communications), es decir, las comunicaciones a través de la red eléctrica. Las redes PLC son muy sencillas de instalar y de ampliar y además su coste de instalación es extremadamente bajo.

El estándar más aceptado dentro de la tecnología PLC es Homeplug AV (HP audio-vídeo, o simplemente HPAV). Este estándar proporciona un ancho de banda de hasta 150 Mbps sobre los cables de baja tensión existentes en cualquier edificio.

En este trabajo se muestran brevemente las características del canal PLC y se proponen los códigos Fountain como un mecanismo eficaz para la transmisión fiable de datos en este tipo de redes.

2 Homeplug AV

Homeplug AV es un estándar para la transmisión de datos en redes PLC de bajo voltaje (220v) auspiciado por la Homeplug Alliance [3]. Su principal propósito es proporcionar suficiente capacidad para soportar un acceso a Internet de banda ancha y, a la vez, permitir la distribución de contenidos de audio y vídeo. Esta tecnología es capaz de proporcionar una capacidad de hasta 150 Mbps utilizando técnicas como Turbo-códigos convolucionales para la detección y corrección de errores y una modulación OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) con 917 portadoras disponibles.

2.1 Nivel Físico

HPAV opera en el rango de 2 a 28 MHz y proporciona una tasa de transmisión de 200 Mbps. El uso de Turbo Códigos Convolucionales para la detección y recuperación automática de errores reduce la tasa real de bits de información transmitida a aproximadamente 150 Mbps.

La modulación utilizada para la transmisión es OFDM. Esta modulación se basa en la transmisión simultánea de un gran número de portadoras ortogonales entre sí y con un ancho de banda muy reducido. El transmisor se encarga de detectar las características del canal con objeto de eliminar las portadoras con un SNR más pobre y seleccionar la modulación y codificación adecuada para cada una de las portadoras restantes.

2.2 Nivel de control de acceso al medio (MAC)

El nivel MAC de HPAV se encarga de aceptar los datos del nivel superior y encapsularlos añadiéndoles una cabecera, formando lo que denominaremos una trama MAC. Cada trama MAC es a su vez dividida en segmentos, que pueden ser codificados, transmitidos y decodificados de manera independiente. Estos segmentos son entregados al nivel físico, el cual les añade el código FEC correspondiente y los transmite al medio. El nivel MAC de HPAV puede establecer dos modos de transferencia distintos:

- Transferencias orientadas a conexión con requerimientos de QoS. Este servicio se proporciona utilizando un sistema TDMA (*Time Division Multiple Access*).
- Transferencias no orientadas a la conexión (*connectionless*) que comparten un mismo canal de comunicaciones (*contention*). Se proporciona mediante un esquema CSMA/CA basado en prioridades.

3 Códigos Fountain

El protocolo más ampliamente utilizado para la transmisión de datos en todo tipo de redes es TCP. Sin embargo, TCP está pensado para un canal de comunicaciones *full-duplex* y sus prestaciones bajan de una manera importante en canales *half-duplex* como es el caso del canal PLC.

Una alternativa a TCP para la transmisión en este tipo de medios son los códigos *Fountain*. Estos códigos permiten la transmisión fiable de información sin necesidad de un canal de retorno. La naturaleza *half-duplex* de HPAV nos da a entender que utilizando este tipo de códigos para la transmisión de datos se alcanzarán prestaciones similares o incluso mejores que con TCP.

Los códigos *Fountain* se basan en la idea de que el transmisor puede verse como una fuente de agua que es capaz de producir una cantidad infinita de gotas de agua. El receptor representa un recipiente que necesita recoger un cierto número de esas gotas para poder obtener la información. La ventaja principal que presentan este tipo de códigos es que el receptor puede recuperar la información sin importarle cuales de esas gotas ha recogido. Una codificación de tipo *Fountain* debe cumplir las siguientes características:

- El transmisor debe ser capaz de generar una cantidad potencialmente infinita de paquetes codificados a partir de la información que desea transmitir.
- El receptor debe poder decodificar un mensaje formado por K paquetes a partir de cualquier conjunto de K' paquetes codificados, para un valor de K' ligeramente superior a K .

Las tres implementaciones más importantes que existen en la actualidad de este tipo de códigos son los códigos *LT* [1], los códigos *Raptor* [6] y los códigos *Online* [2].

3.1 Códigos Online

Los códigos Online están definidos por dos parámetros, ϵ y q , además de por el tamaño de bloque. Un mensaje de k símbolos de entrada, podría ser decodificado a partir de $(1+3\epsilon)k$ símbolos codificados con una probabilidad de error dada por la expresión $(\epsilon/2)^{(q+1)}$. La estructura general de estos códigos se muestra en la Fig. 1.

Podemos ver como el proceso de codificación se divide en un código exterior y un código interior. El código interior se encarga de la generación de los bloques codificados, también llamados *check blocks*. Cada *check block* se calcula como la operación XOR de d bloques del mensaje a transmitir escogidos de manera uniformemente aleatoria (d representa el grado del *check block*). La probabilidad de que $d=i$ viene dada una distribución de probabilidad determinada ($p(i)$) mostrada en [2].

Debido a que la elección de los bloques del mensaje original es aleatoria, puede ocurrir que alguno de dichos bloques no sea seleccionado. Para solucionar este problema se añade una codificación previa (código exterior) que genera $0.55q\epsilon k$ bloques auxiliares a partir del mensaje original. El conjunto de bloques del mensaje original más los bloques auxiliares se denomina mensaje compuesto (*Composite message*) y es la entrada del código interno. La redundancia introducida mediante el código externo permite que los bloques del mensaje original que no son seleccionados en el código interno puedan ser recuperados correctamente.

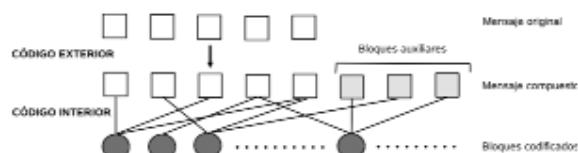


Fig. 1 Estructura de los códigos Online

Para generar los bloques auxiliares se sigue el siguiente procedimiento: Para cada bloque del mensaje original se seleccionan q bloques auxiliares. Posteriormente, cada uno de los bloques auxiliares se calcula como la operación XOR de los bloques del mensaje original que se le han asignado.

Para poder realizar el proceso de decodificación el receptor debe conocer tanto el grado de cada bloque codificado como los bloques del mensaje compuesto por los que está formado (llamados bloques adyacentes). Una vez que el receptor posee toda la información necesaria, el proceso de decodificación que utiliza para obtener los bloques del mensaje compuesto a partir de los *check blocks* recibidos es el siguiente:

1. Encontrar un *check block* que solo tenga un bloque adyacente ($d=1$) y recuperar dicho bloque del mensaje compuesto.
2. Eliminar el bloque recuperado de los demás *check blocks* de los que forma parte, aplicando de nuevo la operación XOR. Esto hace que el grado de los *check blocks* que contenían el bloque recuperado se decremente en una unidad y que puedan aparecer nuevos bloques de grado uno.
3. Continuar con este proceso hasta recuperar una fracción $1-\epsilon/2$ de los bloques del mensaje compuesto (suficiente para recuperar el mensaje original). El proceso de decodificación falla si en algún paso no hay *check blocks* de grado uno.

Una vez que hemos obtenido los bloques necesarios del mensaje compuesto, se pueden recuperar los bloques del mensaje original aplicando el mismo procedimiento.

4 Evaluación

A continuación se comprobarán las prestaciones ofrecidas por los códigos *Fountain* para la transmisión de datos en este tipo de redes y se compararán los resultados con TCP. Las medidas se han realizado sobre un escenario con seis ordenadores conectados mediante dispositivos HPAV. Dos parejas de ordenadores se emplean para generar transmisiones simultáneas a la que se desea medir y los dos ordenadores restantes actúan como transmisor y receptor de códigos *Fountain* y del protocolo TCP respectivamente. Con este escenario se consigue emular una red PLC convencional en la que pueden aparecer otros equipos que compitan por el canal.

La implementación de los códigos *Fountain* utilizada tiene como base la encontrada en [5]. A dicha implementación se le ha añadido la posibilidad de transmisión UDP de los paquetes codificados. Para las transmisiones TCP se utilizó la aplicación SCP [4] que se basa en este protocolo para la transmisión de los datos. Las medidas realizadas consistieron en la transmisión de ficheros de tamaño comprendido entre 1 y 20 MB midiendo en cada caso el tiempo necesario para llevar a cabo la transmisión. Los resultados se muestran en la Fig. 2.

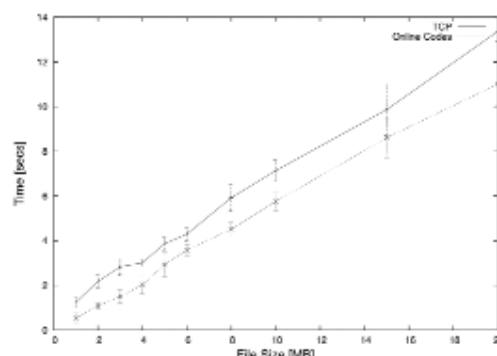


Fig. 2 Comparación de los resultados proporcionados por los códigos Online y TCP. Intervalos de confianza al 95%

Se observa como el tiempo necesario para transmitir el fichero con los códigos Online siempre es menor que el empleado por la aplicación SCP. Esta diferencia de tiempos está en torno a 1 segundo para tamaños de fichero pequeños y aumenta hasta los 2 segundos cuando aumenta el tamaño del fichero.

5 Conclusiones

Observando los resultados obtenidos, se puede concluir que los códigos *Fountain* son una alternativa bastante interesante para la transmisión de datos en canales de acceso compartido (p.e PLC). Mediante la utilización de estos códigos se consiguen tiempos de transmisión menores que con otros protocolos tradicionalmente utilizados para este fin como TCP.

Agradecimientos

Esta investigación ha sido apoyada por la subvención TEC2007-67966-C03-01/TCM (CON-PARTE-1) y también se ha desarrollado en el marco del "Programa de Ayudas a Grupos de Excelencia de la Región de Murcia", de la Fundación Séneca, Agencia de Ciencia y Tecnología de la RM. Pedro José Piñero Escuer también agradece a la Fundación Séneca la concesión de una beca predoctoral FPI.

Referencias

- [1] M. Luby, *LT Codes*, Foundations of Computer Science, 2002. Proceedings. The 43rd Annual IEEE Symposium on, pages 271--280.
- [2] P. Maymounkov and D. Mazières. Rateless codes and big downloads. In IPTPS 2003, USA, February 2003, Revised Papers, pages 247--255.
- [3] HomePlug Powerline Alliance. <http://www.homeplug.org>.
- [4] scp-secure copy, 2009, <http://www.mksoftware.com/docs/man1/scp.1.asp>.
- [5] Implementation of Online Codes, 2009, <http://sourceforge.net/projects/onlinecodes>.
- [6] A. Shokrollahi, Raptor codes. *IEEE/ACM Trans. Netw.*, 14, pages 2551--2567, 2006.

Planificación de Redes Troncales de Conmutación Óptica Transparente

Ramón Aparicio Pardo, Belén García Manrubia, Pablo Pavón Mariño
 Universidad Politécnica de Cartagena,
 Departamento de Tecnologías de la Información y Comunicaciones,
 Plaza del Hospital 1, 30202, Cartagena (Murcia)
 Teléfono: 968 33 8871
 E-mail: {ramon.aparicio, belen.garcia, pablo.pavon}@upct.es

Resumen. El continuo crecimiento de Internet está obligando a buscar nuevos medios para proporcionar mayores capacidades de transmisión en las redes de comunicaciones. Las redes troncales de conmutación óptica transparente representan una respuesta factible a corto y medio plazo para lograr este fin. Por tanto, la planificación de estas redes, buscando un diseño que minimice los costes de la red, tanto OPEX como CAPEX, adquiere una especial relevancia. Este artículo pretende hacer una breve exposición de los conceptos básicos de este tipo de planificación. Para concluir se muestra un caso de estudio, donde se compararan las principales metodologías de planificación de redes ópticas transparentes.

1 Redes Troncales de Conmutación Óptica Transparente

El enorme crecimiento experimentado por Internet, junto con la aparición de nuevos servicios y aplicaciones que necesitan más ancho de banda (video bajo demanda, IP-TV,...) están obligando a aumentar la capacidad de la red troncal de comunicación, que interconectan los grandes centros de tráfico. Las redes troncales se basan en enlaces de fibra óptica, un medio que posee excelentes características como soporte de comunicaciones, tales como un enorme ancho de banda (potencialmente 50 Tbps), una baja atenuación de señal (0,2 dB/km), una baja distorsión de señal, bajos consumos de potencia, ... [1].

Una red de conmutación óptica consiste en un conjunto de nodos de conmutación interconectados por medio de enlaces de fibra óptica. A los enlaces de fibra se les suele llamar *enlaces físicos*, y al grafo de interconexión de los nodos mediante estos, *topología física*. Existe una limitación muy seria al tratar de aprovechar el enorme ancho de banda óptico, pues mientras en una fibra monomodo éste es de casi 50 Tbps, las velocidades de conmutación electrónica en los nodos son como máximo de unos pocos gigabits por segundo [1]. A esto se le llama “cuello de botella electrónico”. Con el objeto de superar este desajuste de capacidades, se utiliza la técnica de *multiplexación por división de longitud de onda* (*Wavelength Division Multiplexing, WDM*). En esta técnica, el ancho de banda proporcionado por la fibra óptica, es dividido en canales de transmisión de menor capacidad, centrados en torno a una longitud de onda (color) de luz láser. Aun así, surge el problema de cómo llevar a cabo la conmutación de la información presente en estos canales de longitud de onda sin procesarla electrónicamente, esto es, de manera

transparente evitando el mencionado “cuello de botella”. Varios paradigmas de conmutación óptica han sido propuestos: conmutación óptica de paquetes (OPS), conmutación óptica de ráfagas (OBS), conmutación óptica de circuitos (OCS)... Pero es esta última técnica, también llamada Encaminamiento de Longitud de Onda (*Wavelength-Routing, WR*), la única para la cual los dispositivos necesarios para implementarla se hallan técnicamente maduros [2].

Los nodos de conmutación de una red *Wavelength-Routed* disponen de equipamiento de conmutación tanto electrónica como óptica. En la Fig. 1 se muestra la arquitectura típica de un nodo de conmutación de estas redes. El núcleo del equipamiento óptico recibe el nombre de *Wavelength Cross Connect (WXC)*, dispositivo capaz de conmutar canales individuales de longitud de onda, simultáneamente, de una fibra de entrada a una fibra de salida de modo transparente en el dominio óptico, esto es, independientemente de parámetros como la modulación de la señal, o la tasa binaria [2]. En cambio, el equipamiento electrónico para el mismo fin requiere convertir la señal a formato electrónico, procesarla en dicho formato y devolverla al dominio óptico. En las redes *Wavelength-Routed*, el tráfico es cursado a través de caminos ópticos establecidos entre los nodos finales de la comunicación. Estos caminos son conocidos como *lightpaths* y en ellos el tráfico es conmutado en los nodos atravesados de manera transparente mediante *WXC*s (camino de datos marcado como 1 en la Fig. 1). Si un flujo de datos entre un par de nodos no puede alcanzar su destino mediante un *lightpath* directo, se hace necesario el uso de al menos dos *lightpaths*. En este caso, los datos serán conmutados electrónicamente a tasas de procesamiento menor (“cuello de botella electrónico”) en el nodo donde el flujo cambia de *lightpath* (camino de datos marcado como 2 en la Fig. 1). Finalmente, a los *lightpaths* también se les suele llamar *enlaces*

virtuales, y al grafo de interconexión de nodos mediante ellos, *topología virtual*.

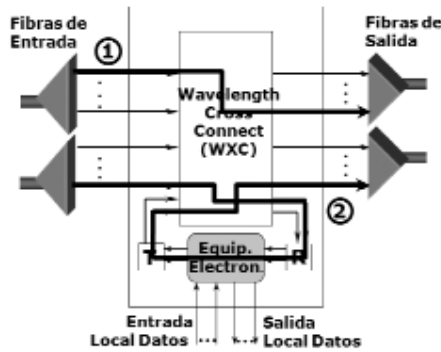


Fig. 1. Arquitectura típica de un nodo de conmutación de una red *Wavelength-Routed*.

2 Planificación de redes ópticas transparentes

La planificación de redes de conmutación óptica transparente (*Wavelength-Routed*) supone resolver el llamado problema de diseño de topologías virtuales (*Virtual Topology Design Problem, VTD*). Este problema recibe como entradas la topología física de la red y el tráfico (estimado o conocido) entre los nodos de la red. El problema *VTD* se suele descomponer en cuatro subproblemas [1]: a) selección de la topología virtual, donde los *lightpaths* son definidos en términos de nodos orígenes y destino; b) encaminamiento de los *lightpaths*, donde se determina la secuencia de enlaces físicos atravesados por cada uno; c) asignación de la longitud de onda, donde se decide los canales de longitud de onda ocupados en cada enlace por el *lightpath*; y, d) encaminamiento de los flujos de tráfico sobre la topología virtual, donde se establece para cada flujo de tráfico, la secuencia de *lightpaths* que debe atravesar. Los subproblemas b) y c) suelen ser agrupados bajo la denominación de *Routing and Wavelength Assignment (RWA)* [1]. Resolver conjuntamente estos cuatro subproblemas implica resolver un problema *multicapa*. Existen diferentes variantes de este problema *multicapa* donde se introducen aspectos adicionales.

Los problemas de planificación mencionados pueden ser formulados como un problema de optimización lineal entera-mixta (*Mixed-Integer Linear Programming, MILP*) [1]. En una formulación *MILP*, se buscan los valores de las variables de decisión (variables que representan nuestras decisiones de planificación: encaminamiento de *lightpaths*, encaminamiento de flujos,...) que minimizan o maximizan una determinada función lineal objetivo. Esta función generalmente será una función que modela los costes de la red. El conjunto de los valores (enteros o continuos) que pueden tomar las

variables de decisión estarán limitados por restricciones lineales. Este esquema inicial se modificará en función del tipo de problema. Así, el diseño de redes resistentes a fallos, supondrá un aumento del tamaño del problema, al considerar también los sistemas de respaldo [4]. O la planificación *Physical Layer Impairment Aware RWA (PLIA-RWA)*, introducirá no linealidades en la restricciones de nuestro problema, provenientes de la capa física [5].

Se ha demostrado, que cada uno de los subproblemas a), b) y c) (y por tanto, cualquier otro problema que los contenga), son de clase NP-completa [4]. Esto significa que el tiempo de computación necesario para resolverlos crecen de manera exponencial con el tamaño del problema, volviéndose computacionalmente intratables para redes moderadamente grandes. La formulación *MILP* nos ofrece una técnica de resolución que proporciona soluciones exactas pero inalcanzables para tamaños grandes de red. Esto nos lleva, al empleo de algoritmos de planificación heurísticos para resolver tamaños mayores en márgenes de tiempo razonables. Los heurísticos proporcionan soluciones sub-óptimas. Si estas son suficientemente próximas a las soluciones óptimas, el heurístico es considerado un algoritmo aceptable. El problema es cómo evaluar las bondades de un heurístico. Aquí, tenemos dos alternativas. La primera, es comparar las soluciones del heurístico con las soluciones exactas de una formulación *MILP* para tamaños moderados del problema, donde todavía es posible calcular la solución óptima. Otra alternativa, es calcular analíticamente cotas al valor de la solución óptima del problema (sin conocer este valor óptimo). Si nuestro heurístico proporciona soluciones cercanas a esas cotas, sabemos que son también soluciones cercanas a la solución óptima. Esta técnica puede ser empleada, además, para tamaños grandes del problema. Sin embargo, no siempre es fácil encontrar cotas lo suficientemente ajustadas al óptimo para ser útiles en la evaluación de los heurísticos. Podemos concluir que no existe una única técnica capaz de resolver cualquier problema de planificación, sino que debemos combinar todos los procedimientos anteriores teniendo en cuenta el problema concreto a resolver.

3 Un ejemplo de planificación

En esta sección, compararemos un algoritmo heurístico con una formulación *MILP* para resolver el problema clásico *multicapa* presentado en la sección anterior. Con este fin se han llevado a cabo una serie de pruebas empleando la herramienta *MatplanWDM* [5].

Utilizaremos como entradas del problema la topología física de la red de investigación Internet 2 [6], mostrada en la Fig. 2; y la matriz de tráfico simétrica, recogida en la Tabla 1. Esta matriz de tráfico ha sido calculada a partir de un modelo de

población-distancia, donde los tráficos entre un par de nodos son mayores cuanto mayor es la población de los nodos, y menores cuanto mayor es la distancia entre los mismos [7]. En la Tabla I, además del tráfico en Gbps entre los nodos, se muestra las distancias en kilómetros entre los mismos.



Fig. 2 Topología física Internet2.

TABLA I
Matriz de tráfico en Gbps de Internet2 (triangular superior) y distancias en Km (triangular inferior)

	0	1	2	3	4	5	6	7	8
0		16.1	13.8	8.7	8.5	8.5	7.4	6.2	7.0
1	1342		16.3	10.9	14.2	14.2	16.5	8.9	10.5
2	913	1303		11.7	11.2	10.1	7.5	7.5	8.8
3	-	1330	-		16.0	17.8	12.9	12.2	14.8
4	-	1705	-	818		16.9	16.2	12.4	16.3
5	-	-	-	690	-		29.5	18.6	20.0
6	-	-	-	-	-	1400		30.5	22.2
7	-	-	-	-	-	905	278		17.7
8	-	-	-	-	1385	1045	-	700	

La formulación *MILP* empleada queda definida en detalle en la ayuda de [5]. En cuanto a la función objetivo, se ha pretendido minimizar, en primer lugar, el número total de *lightpaths* necesarios para cursar todo el tráfico, y en segundo lugar, el número de *lightpaths* atravesados por un flujo de datos entre un par de nodos, para lo cual se han utilizado un coste de conmutación electrónica de 1 por cada Gbps conmutado, y un coste por tranceptor de 10 por cada Gbps recibido/transmitido ópticamente. En cuanto al algoritmo heurístico empleado [5] intenta minimizar como objetivo principal también el número de *lightpaths* a establecer. El algoritmo consiste en un bucle principal dividido en dos partes. En primer lugar, el algoritmo trata de encaminar todo el tráfico posible empleando la topología existente. En la segunda parte, el objetivo es crear un nuevo *lightpath* entre el par de nodos con el máximo flujo de tráfico posible remanente. Si no es posible, tratará de establecer el *lightpath* entre el par con el segundo mayor flujo de tráfico y así sucesivamente. El bucle finaliza cuando el algoritmo no es capaz de encaminar más cantidad de tráfico y no es posible establecer más *lightpaths*.

Para evaluar el algoritmo heurístico y la formulación *MILP*, se han resuelto varias instancias del problema de planificación variando el tráfico total ofrecido entre los valores {500, 1000, 1500, 2000, 2500} Gbps. Se ha asumido que la capacidad de los canales *WDM* en todas las fibras es de 10 Gbps. También se han calculado analíticamente cotas inferiores al número total de *lightpaths* necesarios. La Tabla II recoge los resultados obtenidos para el número de *lightpaths* y el tiempo de ejecución empleado en cada caso. Observando las columnas relativas al número de *lightpaths*, es claro que la solución *MILP* queda ajustada a las cotas, pues se trata de la solución óptima. Además, vemos que las cotas analíticas constituyen una buena aproximación de las soluciones óptimas. De hecho, a medida que el tráfico ofrecido aumenta, los valores de éstas se acercan progresivamente al valor de las cotas, estando la diferencia entre ambos valores siempre por debajo del 3 % partir de 1000 Gbps. En cuanto al algoritmo, podemos comprobar que sus resultados son algo peores que los obtenidos por el *MILP*. De nuevo, a medida que se aumenta el tráfico ofrecido, la desviación entre el número de *lightpaths* de la solución *MILP* y el obtenido por el algoritmo heurístico, decrece. La mayor desviación es de un 15.25% para 500 Gbps de tráfico, y la menor corresponde a un 3.10% para 2500 Gbps. Si nos centramos en los tiempos de ejecución empleados, cabe destacar la gran diferencia entre la rápida ejecución del algoritmo frente a los tiempos más largos de la formulación. La formulación *MILP* es unas 100 veces más lenta que el heurístico para todos los casos probados. Esto nos da una idea de la lentitud de las formulaciones *MILP* frente a los heurísticos. Por tanto, estos resultados parecen sugerirnos, en primer lugar, que las cotas calculadas constituyen una buena estimación del número mínimo de *lightpaths* necesarios para cursar el tráfico ofrecido, y que esta estimación mejora si aumentamos el valor del tráfico; y en segundo lugar, que el heurístico propuesto genera soluciones sub-óptimas tanto más próximas al valor óptimo como mayor sea la carga de tráfico de la red, y que, además, estas soluciones son generadas en plazos de tiempo dos órdenes de magnitud menores que los empleados por el *MILP*.

TABLA II

Tráfico total ofrecido (Gbps)	Número de <i>lightpaths</i>			Tiempo de ejecución (s)	
	Cota inferior	MILP	Hcur.	MILP	Hcur.
500	108	118	136	89.21	0.42
1000	208	214	232	109.09	0.59
1500	310	318	332	136.75	0.76
2000	410	416	438	137.89	1.05
2500	506	516	532	176.09	1.20

3 Conclusiones

A lo largo de este artículo hemos mostrado los conceptos básicos de la planificación en redes de conmutación óptica transparente. Se ha empezado definiéndolas, centrándonos en desarrollar el paradigma de conmutación *Wavelength Routing*. A continuación hemos explicado los principales problemas de diseño y procedimientos de resolución de los mismos implicados en la planificación de estas redes. Y finalmente, se ha utilizado un caso de estudio sencillo para ejemplificar los conceptos introducidos. En este estudio, hemos comparado las soluciones obtenidas por una formulación *MILP* con las halladas por un algoritmo heurístico, llegando a la conclusión de que el heurístico ofrece un procedimiento para obtener soluciones sub-óptimas suficientemente buenas con tiempos menores de ejecución que el empleado por la formulación *MILP* para hallar las soluciones óptimas. También se ha calculado por procedimientos analíticos unas sencillas cotas a los valores óptimos, y las hemos evaluado frente a las soluciones *MILP*. De esta comparación, hemos comprobado la utilidad de estas cotas como estimadores de los valores óptimos. Como conclusión final, diremos que la planificación de redes ópticas transparentes es un campo de investigación activa en la actualidad, ya que este tipo de redes están en proceso de despliegue, momento en que la planificación de las mismas es la tarea a resolver.

Agradecimientos

El trabajo descrito en este artículo ha sido realizado con el apoyo de los proyectos *BONE* ("*Building the Future Optical Network in Europe*"), una Red de Excelencia financiada por la Comisión Europea a través del 7º Programa Marco; el proyecto español TEC2007-67966-01/TCM CONPARTE-1; y el proyecto FORMA 00002/CS/08 de la Fundación Séneca, Agencia de Ciencia y Tecnología de la Región de Murcia; y desarrollado en el marco del "Programa de Ayudas a Grupos de Excelencia de la Región de Murcia, de la Fundación Séneca" (Plan Regional de Ciencia y Tecnología 2007/2010).

Referencias

- [1] B. Mukherjee, *Optical WDM Networks*, Springer Science+Business Media, Inc.. ISBN: 0-387-29055-9 (2006).
- [2] T. S. El-Bawab, *Optical Switching*, 1ª ed., New York, Springer Science+Business Media, Inc. ISBN: 0-387-26141-9 (2006).
- [3] A.K. Somani, *Survivability and Traffic Grooming in WDM Optical Networks*, Cambridge University Press. ISBN: 0-521-85388-5 (2008).

- [4] B. Mukherjee, D. Banerjee, S. Ramamurthy, A. Mukherjee. "Some Principles for Designing a Wide-Area WDM Optical Network". *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Vol. 4, No. 5, pp. 684-696, October 1996.
- [5] *MatPlanWDM* disponible en Matlab Central: <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/13791>
- [6] Internet 2 Global Research Network Operations Center: <http://www.abilene.iu.edu/>
- [7] R.S. Cahn, *Wide Area Network design. Concepts and tools for optimization*, San Francisco, CA: Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1998.

Sistema de Medidas de Banda Ancha en el Dominio del Tiempo y Comparación con Sistema en el Dominio de la Frecuencia

Concepción García Pardo, José María Molina García-Pardo,
José-Víctor Rodríguez, Leandro Juan Llácer

Dpto. Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (TIC)
Grupo Sistemas de Comunicaciones Móviles (SiCoMo)
Plaza del Hospital, 1. Antiguo Cuartel de Antigones. 30202 Cartagena (Murcia)
Teléfono: 968 33 8867 Fax: 968 33 8867
E-mail: conchi.gpardo@upct.es

Resumen. En este artículo se presenta un nuevo sistema de medidas de banda ancha en el dominio del tiempo. El sistema consiste en el uso de una portadora cuya frecuencia es ajustable, modulada por un tren de pulsos que representan un código de pseudo ruido (PN) cuya frecuencia de chip es de 100MHz. Una vez la señal es recibida, se demodula, y la respuesta al impulso del canal puede ser extraída mediante correlación con el código original. Además, se presentan resultados experimentales para medidas realizadas en una habitación así como su comparación con las medidas realizadas en la misma situación por un sistema de medidas del canal en el dominio de la frecuencia.

1 Introducción

Las señales de banda ancha pueden experimentar diferentes efectos de propagación a los clásicos sistemas de banda estrecha [1]. Para la realización de medidas en banda ancha, se pueden emplear tanto sistemas en el dominio de la frecuencia como en el dominio del tiempo. Sin embargo, estos últimos presentan una mayor resolución temporal así como una mayor velocidad en la toma de medidas que hace que estos sistemas se adapten mejor a canales de gran ancho de banda con gran variabilidad temporal. Es por este motivo que se han ido desarrollando diferentes implementaciones de sistemas de medidas en el dominio temporal para sistemas de banda ancha [2-4].

Por un lado, los sistemas basados en la frecuencia se basan en el uso de un analizador de redes vectorial, que mide los parámetros de dispersión o parámetros S entre sus puertos para un número de puntos en frecuencia. De esta manera, el parámetro S_{21} mide la transmisión de energía del puerto 1 al puerto 2.

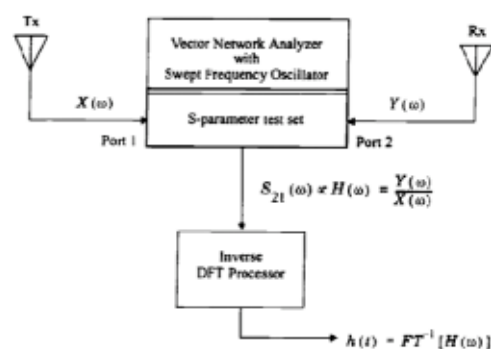


Fig. 1. Esquema de medidas en el dominio de la frecuencia empleando un analizador de redes vectorial [5].

Según lo anterior, una vez conocido el parámetro S_{21} , mediante una transformada inversa de Fourier, se puede calcular la respuesta al impulso del canal en el tiempo.

Sin embargo, los analizadores de redes vectoriales presentan el inconveniente de estar limitados en cuanto al número de puntos en frecuencia que se pueden adquirir. Si bien esto no es un problema para los clásicos sistemas de banda estrecha, sí lo es para los sistemas de banda ancha. Otro inconveniente es la no realización de la medida en tiempo real. Para canales que varían rápidamente en el tiempo, la respuesta en frecuencia del canal puede variar rápidamente, dando una respuesta al impulso errónea. Este problema se puede mitigar reduciendo el número de puntos en frecuencia a tomar, para agilizar la toma de la medida. Sin embargo, de este modo se sacrifica la resolución temporal de la respuesta al impulso del canal [5].

Por otro lado, los sistemas de medidas en el dominio del tiempo se basan en el uso de una señal de código de pseudo ruido de máxima longitud (PN MLS) o *m-secuencias*, con características de autocorrelación especialmente interesantes para aplicaciones de medida del canal [6]. Dicha señal modula a una portadora a alta frecuencia que es amplificada y transmitida. La señal es recibida por un osciloscopio, demodulada y la respuesta al impulso del canal se puede hallar, simplemente correlando la señal de código original con la demodulada. Este sistema presenta la ventaja de una gran rapidez en la toma de medidas. Sin embargo, presenta la desventaja de que en realidad la respuesta al impulso del canal no es obtenida en tiempo real si la demodulación no se realiza de forma síncrona.

El trabajo aquí presentado se basa en el desarrollo de un sistema de medidas del canal de banda ancha en el dominio del tiempo. Además, se han realizado medidas experimentales del canal en la banda de 2.4 a 2.6 GHz (frecuencia central de 2.5 GHz), aunque el sistema permite ajustar la frecuencia central de la banda bajo estudio. Este artículo se organiza como sigue: en la sección II se describe tanto el equipamiento como el proceso seguido para hallar la respuesta al impulso del canal, en la sección III se presentan resultados derivados de la toma de medidas con este nuevo sistema y en la sección IV se exponen los resultados de este trabajo.

2 Sistema de Medidas

2.1 Equipamiento

Para la implementación de este nuevo sistema de medidas se dispone de un generador en banda base Agilent 81150A que generará el código PN. Esta señal de código en banda base alimenta la entrada I de un modulador I/Q R&S SMATE200A que trabaja en la banda de 2 a 6 GHz. La frecuencia escogida será la frecuencia central de la banda de frecuencias a medir. Para amplificar la señal producida por el generador I/Q se emplea un amplificador Mini Circuits ZHL-42 que trabaja en el rango de 700 a 4200 MHz. Las antenas de que se dispone son antenas omnidireccionales EM-6116 que trabajan en un rango de frecuencias de 2 a 10 GHz.

La señal transmitida es adquirida en recepción por un osciloscopio Agilent Infiniium 90404A que es capaz de adquirir señales de hasta 4 GHz muestrándolas a una velocidad de hasta 20 Gsamples/s en cada uno de sus 4 canales.

2.2 Implementación

Primeramente se genera una *m-secuencia* de 127 bits mediante el código MATLAB disponible en [7]. Este código es cargado mediante un software específico en el generador de señal Agilent 81150A. Dado que se desea que la frecuencia de chip de la señal de código sea de 100 MHz (200 MHz una vez modulada), el generador de señal se establecerá a una frecuencia de repetición de la señal de código de 787.4016 kHz.

Esta señal de código $c(t)$ alimenta la entrada I del generador I/Q, con lo que la señal generada, que posteriormente será amplificada y transmitida, será:

$$s_{TX}(t) = c(t) \cos(2\pi f_0 t) \quad (1)$$

donde $f_0 = 2.5$ GHz (que puede variar en función de la banda de frecuencias bajo estudio), es la frecuencia central para la banda de 2.4 a 2.6 GHz. En la Fig. 2 se muestra el sistema de transmisión completo.



Fig. 2. Fotografía del equipo de transmisión.

En recepción la señal es adquirida por el osciloscopio por un tiempo igual a la duración del código, $1.27 \mu s$, y se almacena para ser procesada posteriormente.

2.3 Postprocesado

Una vez la señal es capturada por el osciloscopio, se realiza el postprocesado de la señal recibida con el fin de extraer la respuesta al impulso del canal. Para tal fin, se cuenta con la adquisición de la señal recibida en el osciloscopio de 127 bits ($1.27 \mu s$) así como de una captura de la señal de código original a la salida del generador 81150A de duración al menos dos veces la duración del código, esto es, 255 bits ($2.55 \mu s$).

Primeramente se ha de demodular la señal recibida. Para ello, se multiplica dicha señal por una portadora de frecuencia $f_0 = 2.5$ GHz, sincronizada con la señal a demodular. Posteriormente, y con el fin de eliminar el armónico a frecuencia doble generado, se aplica un filtrado paso bajo de Butterworth cuya frecuencia en la banda de paso es de 150 MHz y en la banda eliminada de 500 MHz. El filtro seleccionado pierde menos de 1 dB en la banda de paso, y al menos 60 dB en la banda eliminada. De esta manera, se recuperan 127 bits de código que modulaban la señal portadora.

Dado que la correlación es una medida de la similitud entre dos señales aleatorias, al calcular la correlación de la señal demodulada con la señal de código original de 255 bits, se obtiene un máximo en el punto en el que el código demodulado está alineado con la misma sección dentro de la señal de código original. Conocido el instante donde se da este máximo de la función de correlación, es posible extraer la sección de código de la señal original que coincide con la demodulada.

Una vez se dispone de las dos mismas secciones de código, al calcular nuevamente la correlación entre ambas, se obtiene la respuesta al impulso del canal en el tiempo.

3 Resultados

Una vez se ha presentado la implementación de este nuevo sistema de medidas en el tiempo, se pasa a la toma de medidas experimentales en una habitación a una distancia de 2 metros. La señal que ha sido modulada, amplificada y transmitida, es adquirida por el osciloscopio. Dicha adquisición es asíncrona, es decir, no se tiene información de en qué momento se transmitió aquello que se recibe. Esto presenta la ventaja de no necesitar ninguna señal de transmisión en recepción a la hora de adquirir la señal. Sin embargo, presenta la contrapartida de no aportar información temporal absoluta de la respuesta al impulso del canal medido, sino información temporal relativa respecto a la contribución principal que representa el rayo directo entre transmisor y receptor.

Tras la adquisición de la señal por parte del osciloscopio comienza la etapa de post-procesado. La señal recibida, tras ser multiplicada por una portadora a frecuencia f_0 y ser filtrada con el filtro de Butterworth, es demodulada. Como se comentó anteriormente, se ha de calcular la correlación entre este código demodulado y la señal de código original de 255 bits. La Fig. 3 muestra el resultado de dicha operación.

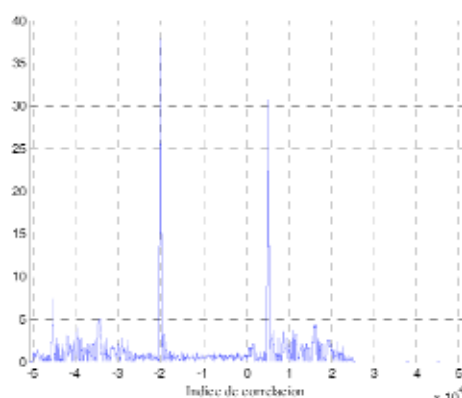


Fig. 3. Correlación de la señal adquirida con código original.

Se ha de señalar que la señal de código original se adquiere una vez al inicio del proceso de toma de medidas y se almacena para el postprocesado posterior.

Conocido el máximo de correlación, se extrae la sección del código original de 127 bits coincidente con el código de 127 bits demodulado, tal y como se presenta en la Fig. 4. Se observa claramente cómo ambas representan la misma secuencia de bits. Nótese la diferencia de amplitud (escala vertical) entre ambas.

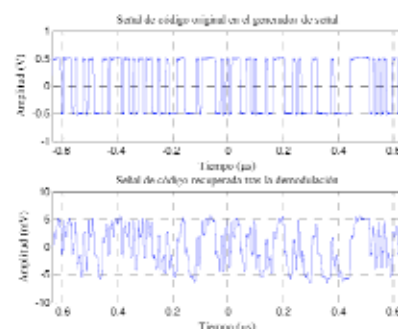


Fig. 4. Señales de código original (arriba) y recuperada tras la demodulación (abajo).

De la correlación de las dos señales anteriores, se extrae directamente la respuesta al impulso del canal según se observa en al Fig. 5. Se debe destacar que la respuesta al impulso no viene referida al tiempo absoluto sino al retardo respecto a la contribución principal (de retardo 0 ns.).

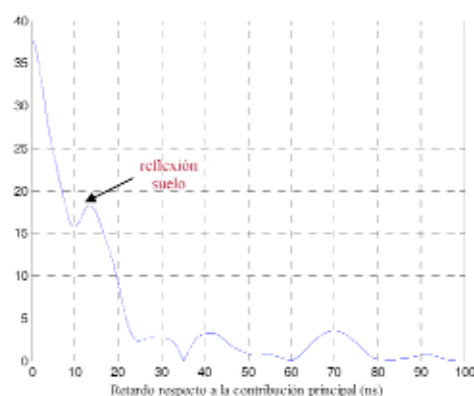


Fig. 5. Respuesta al impulso del canal.

Finalmente, para comparar el resultado obtenido con el nuevo sistema de medidas, se realiza una medida en las mismas condiciones mediante el sistema de medidas en la frecuencia comentado en la introducción de este artículo, empleando para ello el analizador de redes vectorial Agilent E5071B. La respuesta al impulso obtenida se muestra en la Fig. 6.

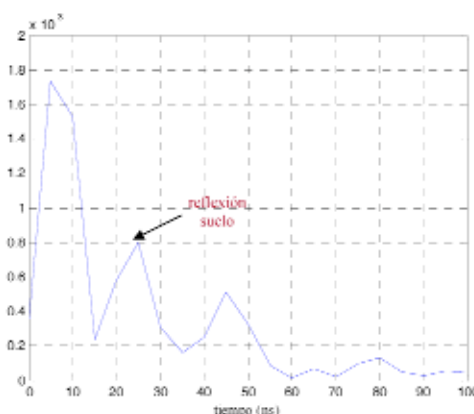


Fig. 6. Respuesta al impulso del canal con sistema de medidas en el dominio de la frecuencia.

De la comparación de ambas se extrae que el retardo con respecto a la contribución principal del rayo directo medida con ambos sistemas de medida es de 13.5 ns con el sistema de medidas basado en el tiempo y de 20 ns en el caso del sistema de medidas en el dominio de la frecuencia. La diferencia entre estos valores se debe principalmente a la gran diferencia de resolución entre ambos tipos de medida.

4 Conclusiones

En este artículo se ha presentado la implementación de un nuevo sistema de medidas en el dominio del tiempo. Este sistema se basa en transmitir código de pseudo ruido de máxima longitud (PN MLS) que modula a una portadora a alta frecuencia. La señal recibida es demodulada y correlada con una sección de código original, extrayéndose así la respuesta al impulso del canal.

Así mismo, se ha realizado una medida con este nuevo sistema de medidas a la distancia de 2 m. Se comprueba que el código es perfectamente demodulado y la respuesta al impulso calculada. Por último, se ha realizado otra medida en idénticas condiciones, con un equipo de medidas en el dominio de la frecuencia, extrayéndose resultados similares.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia (TEC2007-66698-C04-04) y la Fundación Séneca de la Región de Murcia (08818/PI/08).

Referencias

- [1] Andreas F. Molisch, M.G. Di-Benedetto, T. Kaiser, I. Opperman, C. Politano, and D. Porcino, *UWB Communication Systems: A Comprehensive Overview* Hindawi Publishing Corporation, 2006.
- [2] W. Ciccognani, A. Durantini, and D. Cassioli, "Time domain propagation measurements of the UWB indoor channel using PN-sequence in the FCC-compliant band 3.6-6 GHz," *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, vol. 53, no. 4, pp. 1542-1549, 2005.
- [3] T. Takuchi and M. Tamura, "A ultra-wide band channel sounder for mobile communication systems," *12th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, vol. 2, p. E-111-E-115, 2001.
- [4] J. Kivinen, T. O. Korhonen, P. Aikio, R. Gruber, P. Vainikainen, and S. G. Haggman, "Wideband radio channel measurement system

at 2 GHz," *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on*, vol. 48, no. 1, pp. 39-44, 1999.

- [5] Theodore S. Rappaport, *Wireless Communications: Principles and Practice* Prentice Hall PTR (2nd Edition), 2002.
- [6] G. J. M. Janssen and J. A. M. Vriens, "High resolution coherent radio channel measurements using direct sequence spread spectrum modulation," *Proc. 6th Mediterranean IEEE Electrotechnical Conference*, vol. 1, pp. 720-727, 1991.
- [7] Giedrius Buracas, "m-sequence generation program, "mscqm", 2003.
<http://www.mathworks.es/matlabcentral/>

Ajuste de los modelos físicos 802.16 para alta movilidad

Sergio Almagro-Carrión, Fernando Cerdan, Sergio Lujan, Andrés Cabrera

Dpto. Tecnologías de la Información y las Comunicaciones

Universidad Politécnica de Cartagena

Campus Muralla de Mar. Edificio C/Dr. Fleming s/n.

30202 Cartagena

Teléfono: 968325368 Fax: 968 32 5338

E-mail: {sergio.almagro, fernando.cerdan, sergio.lujan, andres.cabrera}@upct.es

Resumen. En los últimos años, la integración de servicios de datos en redes móviles se ha convertido en un objetivo primordial para fabricantes y proveedores de servicios. Dada su robustez y eficiencia, Wimax ha ido ganando protagonismo en dicho mercado, llegando a ser una referencia cuando hablamos de las futuras redes móviles de cuarta generación 4G. Los modelos de simulación para esta tecnología permiten desarrollar nuevas mejoras y conocer su comportamiento. El presente documento se centra en el modelado de la parte física de esta tecnología, resaltando las limitaciones de los actuales modelos y como abordar una modificación para adaptarlos a entornos con usuarios de alta movilidad. Los resultados demuestran que la consideración de la movilidad afecta de forma determinante a la capacidad del sistema, analizada desde el punto de vista de la probabilidad de error binaria (BER).

1 Introducción

Recientemente, los proveedores de servicios han concentrado sus esfuerzos para optimizar la calidad de los servicios móviles. Por lo tanto, las nuevas tendencias en el mercado suponen nuevos desafíos a los fabricantes, cuyos objetivos giran en torno al aprovechamiento óptimo de las tecnologías de banda ancha inalámbrica para la transmisión de datos.

Las tecnología Wimax (Worldwide Interoperability for Microwave Access) es un sistema digital de comunicaciones inalámbrico orientado a las redes de área metropolitana. Wimax proporciona acceso inalámbrico de banda ancha tanto para estaciones fijas como para estaciones móviles, en entornos de 50 km y hasta 15 km, respectivamente.

Considerada una tecnología de segunda generación derivada de Wi-Fi, la tecnología Wimax alcanza tasas de transferencia similares a la de su predecesora. Sin embargo, las mejoras en eficiencia espectral y en robustez proporcionan a dicha tecnología una mayor escalabilidad y alcance del sistema. La tecnología Wimax está definida bajo el estándar del IEEE 802.16, cuyas versiones para dispositivos fijos y móviles se encuentran recogidas en los documentos 802.16d [1] y 802.16e [2], respectivamente.

Las ventajas que imprimen a Wimax una ventaja con respecto a otras tecnologías móviles para la transmisión de datos y servicios integrados radican en el diseño de su capa física. Ésta ha sido especialmente diseñada para transmisión de datos en entornos urbanos y cuenta con avances como la modulación OFDM [3], sofisticados sistemas de corrección de errores, sistemas de

modulación/codificación adaptativa y técnicas de beamforming (AAS).

2 Modelos físicos para Wimax

Para la correcta simulación del comportamiento del nivel físico del sistema, expertos del grupo 802.16 de IEEE desarrollaron una serie de modelos de canal específicos para aplicaciones fijas (FWA). Estos modelos, denominados Stanford University Interim (SUI) [4], constan de seis conjuntos diferentes de parámetros, asociados a diferentes tipos de entorno.

Los efectos que consideran estos modelos son los desvanecimientos de tipo lento y rápido, la dispersión temporal, el ruido del sistema y la dispersión frecuencial del medio de propagación. Sus valores pueden verse en la tabla 1.

Canal	Terreno	Atenuación (dB)		Retardo Max. (μs)	Dispersión frecuencial (Hz)
		Tap 2	Tap 3		
SUI 1	C	-15	-20	0.9	0.5
SUI 2		-12	-15	1.1	0.25
SUI 3	B	-5	-10	0.9	0.5
SUI 4		-4	-8	4	0.25
SUI 5	A	-5	-10	10	2.5
SUI 6		-10	-14	20	0.5

Tabla 1. Características de los canales SUI

En cuanto a los inconvenientes de estos modelos, destacan la falta de precisión en entornos de alta densidad de edificios y la consideración de una movilidad nula en las estaciones cliente. Algunos trabajos como [5,6] revelan tales limitaciones y son especialmente críticos con la falta de movilidad, la consideración de un número muy limitado de líneas de retardo sin visión directa (NLOS) en los mismos y

en la predicción excesiva de atenuación con respecto a datos empíricos.

No obstante, existen otros modelos capaces de predecir los desvanecimientos en el canal en caso de movilidad. Este es el caso de los modelos vehiculares de ITU-T [7], pero el hecho de que estén diseñados para frecuencias por debajo de los 1.5 GHz juega en su contra.

3 Modificación propuesta

La idea propuesta en este trabajo trata de dar solución a la cuestión de la ausencia de movilidad dentro del modelo canal radio. Partiendo de la base de los modelos originales SUI, se ha considerado que es posible considerar la influencia de una mayor velocidad relativa entre obstáculos en la dispersión frecuencial del canal radio.

Como podemos apreciar en la figura 1, diversos obstáculos generan un rebote de la señal original, la cual recorre diversos caminos indicados como "Tap1" y "Tap2". Además, dichos obstáculos se encuentran desplazándose a diferentes velocidades relativas (v_1 , v_2) con respecto a la estación móvil (MS). Es por tanto a consecuencia de este movimiento, que las señales recibidas en la estación móvil quedan desplazadas en frecuencia por el efecto Doppler [8] una cantidad proporcional a su velocidad Δf_i .

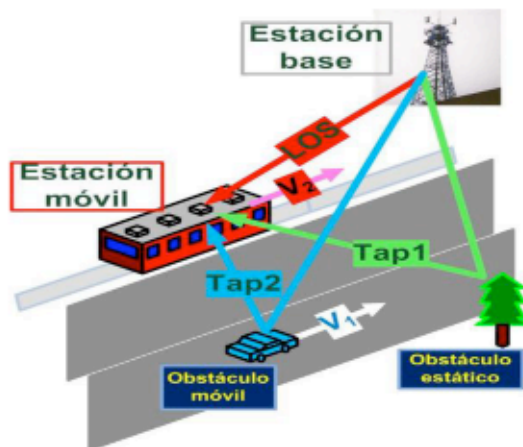


Fig. 1 Entorno con dispersión frecuencial.

Al encontrar obstáculos estáticos y obstáculos móviles dentro del entorno de la MS, las diferentes versiones reflejadas de la señal original tendrán un desplazamiento frecuencial distinto. Como resultado, la señal recibida verá su dispersión frecuencial aumentada, encontrándose el rango de dispersión entre el valor mínimo y el valor máximo del desplazamiento frecuencial de sus contribuyentes. Aquí entra en juego la valoración de que la MS se encuentra ante obstáculos cuya velocidad relativa es más alta (estáticos) y otros cuya velocidad relativa es menor (otros obstáculos móviles).

A consecuencia del efecto anterior, la caracterización del parámetro dispersión frecuencial reflejada en los modelos SUI, parece ser demasiado pequeña, ya que se encuentra en el rango de 0 a 2 Hz. En este trabajo, se considera aumentar este parámetro escalando los valores originales de la dispersión en los modelos SUI por el valor máximo del desplazamiento frecuencial. Esto se expresa en la ecuación (1).

$$fd_i' = \frac{f_m \cdot fd_i}{\max fd_j}, \quad 1 \leq j \leq T \quad (1)$$

$$f_m \approx v/\lambda \quad (2)$$

Donde $f_m = \max\{\Delta f_i\}$ es el desplazamiento máximo en frecuencia, el cual se aproxima mediante (2) y fd_i son los valores originales de dispersión frecuencial asignados por los modelos SUI a cada señal reflejada.

En la ecuación (2), v representa la velocidad relativa entre estación base y móvil y λ la longitud de onda de la señal portadora.

4 Resultados

Esta modificación del modelo de canal ha sido implementada y analizada en un simulador desarrollado bajo el entorno Matlab®. Para ello, se han programado todas las funciones de la capa física y se han ejecutado varios bloques de pruebas.

Cada bloque consta de cuatro simulaciones, dentro de las cuales se repite el cálculo de la tasa de error binaria (BER) frente a una serie de valores de SNR que oscilan entre -5 y 30 dB. Cada una de esas cuatro pruebas se realiza estableciendo valores diferentes de velocidad relativa entre estación móvil (MS) y estación base (BS).

Para el cálculo de la BER se han procesado un total de 1000 símbolos Wimax por cada valor de SNR. Esto nos ha permitido generar una serie de gráficas comparativas basadas en los modelos modificados SUI, dos de las cuales se aprecian en las figuras 2 y 3.

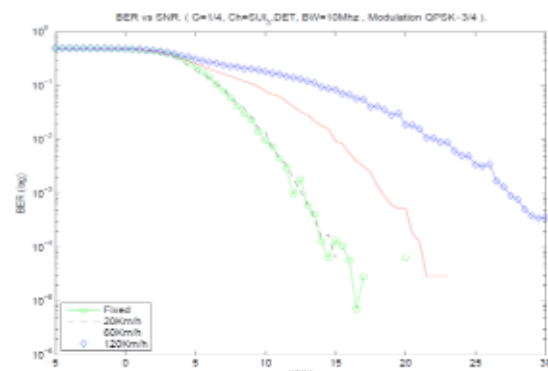


Fig. 2 Gráfico BER vs SNR para canal SUI3.

Cada una de las líneas de la figura 2 representa la respuesta simulada del sistema dado un canal de tipo

SUI3 para velocidades relativas MS-BS de 0, 20, 60 y 120 km/h.

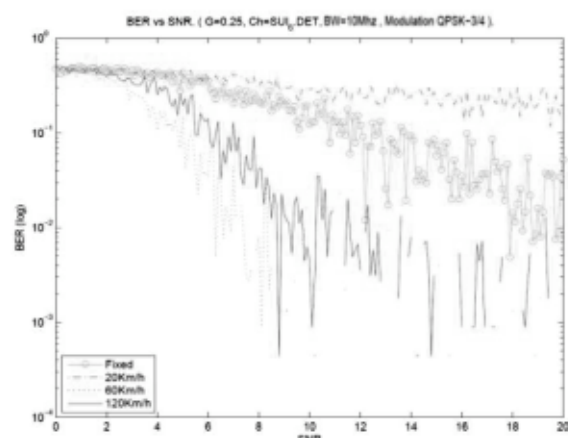


Fig. 3. Gráfico BER vs SNR para canal SUI6.

La figura 3 presenta el resultado de otro bloque de simulaciones para un canal tipo SUI6. En ambos casos las simulaciones se han llevado a cabo para perfiles de trama con modulación QPSK y una tasa de codificación de 3/4. El valor para el ancho de banda del canal elegido ha sido 10 MHz y la duración del prefijo cíclico de un 25% del tiempo de trama.

5 Conclusiones y líneas futuras

Dadas las gráficas, se aprecia como la respuesta del sistema exhibe comportamientos diferentes dentro de un rango de valores de velocidades relativas MS-BS y en función del modelo de canal. En cuanto a la tasa de error, ésta parece decaer de forma más significativa ante valores crecientes de velocidad en el caso de un canal de tipo SUI3. Sin embargo, este comportamiento no se pone de manifiesto en el caso de un canal tipo SUI6, donde los mayores valores de dispersión temporal entre los distintos caminos o "taps" conducen a una mayor tolerancia de la dispersión frecuencial generada a mayores velocidades.

Dentro de las posibles vías de investigación se contempla el desarrollo de un marco de pruebas empíricas con las que contrastar los resultados arrojados por el simulador. De esta forma se pretende corroborar si la respuesta del sistema simulado se adecua a la realidad. Para ello, es necesario abordar el desarrollo de simulaciones y pruebas reales de rendimiento a niveles superiores. Esto se debe a que los equipos actuales no permiten una desactivación de ciertos mecanismos a nivel MAC que dificultan conocer la BER real del sistema.

6. Agradecimientos

TIC-TEC 07/02-0002 (PLEDAX), Fundación Séneca y al "programa de becas asociadas a la realización de proyectos en I+D, innovación y transferencia de tecnología 2007", de la Fundación Séneca, Agencia de Ciencia y Tecnología de la RM".

7. Referencias

- [1] IEEE. 802.16-2004 IEEE "Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems", 2004.
- [2] IEEE. 802.16e IEEE "Physical and Medium Access Control Layers for Combined Fixed and Mobile Operation in Licensed Bands", 2005.
- [3] R. Prasad, OFDM for Wireless Communications Systems, Artech House, ISBN: 1-58053-796-0, 2004.
- [4] IEEE 802.16.3c00/49r2. *Interim Channel Models for G2 MMDS Fixed Wireless Applications*. IEEE 802.16 Working Group.2000. 13p.
- [5] "802.16 Issues with previously proposed channel models for Broadband Fixed Wireless": wirelessman.org/tg3/contrib/802163c-01_26.pdf
- [6] Abhayawardhana, V.S. Wassell, I.J. Crosby, D. Sellars, M.P. Brown, M.G. "Comparison of Empirical Propagation Path Loss Models for Fixed Wireless Access Systems". *BT Mobility Res. Unit, Ipswich, UK*. June 2005
- [7] Sorensen, T.B. Mogensen, P.E. Frederiksen, F. "Extension of the ITU channel models for wideband (OFDM) systems", *Vehicular Technology Conference*, Sept., 2005
- [8] J. D. Jackson, *Classical Electrodynamics*, 2nd ed. (New York: John Wiley & Sons, 1975). Chapter 11.

Plataforma Robótica Antropomorfa SAMANTA

R. López

Laboratorio de Neurotecnología, Control y Robótica (NEUROCOR)

Campus Muralla del Mar

C/ Dr. Fleming, S/N, 30202 Cartagena (Murcia)

Teléfono: 968 325392

E-mail: raullopezt@hotmail.com

Resumen. El proyecto SAMANTA busca de forma bioinspirada la interacción visual-motora de un brazo robot junto con una mano con forma y movimiento semejantes a la humana, y visión estereoscópica. El conjunto de estos elementos forman lo que llamamos "plataforma robótica antropomorfa", cuyo objetivo es el estudio de algoritmos mediante redes neuronales artificiales, para desarrollar la destreza humana de los miembros superiores sobre robots humanoides.

1 Introducción

SAMANTA es un proyecto que nace dentro del contexto general de la aplicación de la Neuro-robótica al campo de las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones. En este proyecto los grupos integrantes; IMSE del CSIC, NEUROCOR de la Universidad Politécnica de Cartagena (UPCT) y RTCAR de la Universidad de Sevilla, desean aplicar su experiencia, en los campos de neurotecnología, robótica, diseño electrónico y desarrollo de un sistema hardware de visión modular AER, a la resolución del problema de la interacción visual-motora, focalizado en primera instancia hacia la solución del problema de la manipulación compleja de objetos y extensible más tarde al campo de la locomoción en sus más diversas posibilidades, así como al campo de la visión. El control del movimiento en humanos se lleva a cabo por subsistemas neuronales distribuidos pertenecientes al sistema nervioso central (SNC), incluyendo la espina dorsal, varias regiones corticales, el cerebelo y los ganglios basales [1]. Este control evoluciona durante el desarrollo del humano a través de la interacción con el entorno y representa un crecimiento continuo y la consolidación tanto de sus habilidades como de su acervo sensorial-motor.

La Neuro-robótica aparece como un campo emergente dentro de las prioridades de la Comisión Europea en el área de las Tecnologías de los Sistemas de Información. En este contexto se trata de crear artefactos capaces de interactuar con el sistema neurológico humano para mimetizar su comportamiento dando lugar a nuevas prótesis o robots cooperativos. En el primer caso se trata de interactuar los dispositivos mecatrónicos (prótesis) directamente con el sistema nervioso, en el segundo caso se trata de robots capaces de interactuar con el humano tanto en la fábrica o en la oficina, como en el hogar [2], [3], [4], [5] y [6].

El presente artículo quiere transmitir de una forma muy clara y breve el propósito de este proyecto, para ello se ha querido estructurar, de forma temporal, en tres fases contando el pasado y el presente del proyecto, además de dar una idea concreta del objetivo que se pretende en un futuro no muy lejano. Estas fases a su vez se dividen en tres puntos que, de forma muy descriptiva, informan del estado de cada fase. Un primer punto que describe brevemente los componentes que constituyen la plataforma robótica, un segundo punto de suma importancia, que es la interconexión de los distintos elementos y por último un breve resumen de las aplicaciones que se han realizado y se pretenden realizar.

2 Antecedentes del Proyecto: SAMANTA

Pasando por distintos proyectos tanto nacionales como internacionales, SAMANTA se ha desarrollado gracias a la interacción de diversos grupos de investigación, estando como lugar de desarrollo principal, en los laboratorios del grupo de investigación NEUROCOR (NEUROtecnología, Control y Robótica).

2.1 Elementos

Los elementos que formaban la plataforma en SAMANTA son los siguientes:

- Mano antropomorfa Cervantes
- Brazo robot industrial ABB
- Cabezal estereoscópico Lince
- Plataforma basada en PC bajo sistema operativo Windows



Figura 1. Agarre de un objeto con la mano Cervantes.

Mano Cervantes

La mano robótica antropomorfa UPCT-NEUROCOR, también llamada “Cervantes”, se inspira en un diseño biomecánico basado en las capacidades de la mano humana. La mano posee dos dedos y un pulgar oponente con tres GDL (Grados de Libertad) asociados a cada dedo y éstos se encuentran montados sobre una palma rígida. El diseño de cada uno de los dedos presenta 3 articulaciones independientes. Estas articulaciones poseen un movimiento de flexión y otro de extensión.

Cada GDL está actuado mediante dos motores DC Maxon y dos tendones de poliestireno enrutados con poleas que en conjunto se comportan como músculos artificiales. Las articulaciones se mueven a través de un sistema oponente agonista-antagonista inspirado en la actuación muscular que lleva a cabo la médula espinal de los primates.

A la hora de mediar la posición de cada articulación, su velocidad y dirección de rotación, se han empleado sensores de posición de efecto Hall integrados en cada GDL de cada uno de los dedos. Los sensores de fuerza FSR se encuentran situados sobre la superficie curvada de cada una de las puntas y sobre la cara interior de la falange medial.

La electrónica de control recibe las órdenes del software de bajo nivel funcionando en un PC dedicado y transmite los datos de la sensorización a dicho PC, todo ello a través de una comunicación via tarjeta PCMCIA. El software de control de alto nivel, basado en modelos de redes neuronales es desarrollado en Matlab.



Figura 2. Mano Cervantes.

Brazo Robot ABB

Brazo robot industrial de 6 GDL de ABB cuyo control se realizaba manualmente mediante un joystick para los movimientos de alcance de los objetos. La mano Cervantes se acopló como elemento terminal a este brazo.



Figura 3. Brazo robot de ABB.

Cabezal Estereoscópico Lince

El cabezal estereoscópico LINCE está formado por dos cámaras industriales y una base con movimiento de elevación (vertical) y movimiento azimut (horizontal).



Figura 4. Cabezal Estereoscópico LINCE.

2.2 Interconexión

A excepción de la mano Cervantes, que utilizaba un prototipo de bus AER basado en PCI, el resto de componentes utilizaban medios comerciales de interconexión; el cabezal de visión estereoscópica utilizaba *framegrabbers* para la captura de imágenes; el brazo de ABB al ser un robot comercial de aplicación industrial, no permite modificar sus algoritmos de control ya que es un sistema cerrado.

2.3 Aplicación

El aspecto innovador de este trabajo radica en la obtención de dispositivos hardware y software capaces de permitir la implantación de una plataforma física de manipulación mano-brazo, con capacidad de aprendizaje incremental (sistemas de procesamiento visual, manipulación y tratamiento háptico), totalmente inspirada en métodos biológicos, trabajando en tiempo real.

Esta plataforma permitió realizar estudios sobre el movimiento oponente de las articulaciones de la mano Cervantes, entre otros estudios que se

banco de pruebas para la realización de una biblioteca de gestos (distintas posiciones de los dedos), para el estudio del agarre de objetos.

3 El proyecto SAMANTA II

SAMANTA quiso ir más allá, mejorando la versatilidad y la apariencia. En el actual proyecto SAMANTA II se pretende dar un carácter más antropomorfo a la plataforma, adquiriendo elementos que dimensionalmente y físicamente tengan un mayor aspecto humano. Por otro lado se ha apostado por software de libre distribución basado en Linux.

3.1 Elementos

Actualmente se dispone de los siguientes elementos:

- Un brazo robot Robotnik
- Una mano antropomorfa Shadow
- Plataforma basada en PC, bajo sistema operativo de libre distribución Linux.



Figura 5. Brazo y Mano: SAMANTA II

Brazo Robotnik

Brazo robot de 6 DOF de dimensiones similares a las de un brazo humano de tamaño medio, cuya arquitectura de control abierta permite la creación de algoritmos propios para el movimiento del brazo.

Mano Shadow

La mano SHADOW, suministrada por la empresa Shadow Robot Company, está formada al igual que la Cervantes por dedos articulados, que mediante tendones y poleas integradas en la mecánica de la mano realizan un movimiento semejante al humano. Con esta mano se sigue conservando la utilización de dos dedos y el pulgar, teniendo todavía en mente como ampliación el añadir los dos dedos que faltan para completar los cinco de la mano humana. La sensorización de la mano SHADOW está integrada en la estructura de la misma, se compone de sensores de posición para cada una de las articulaciones, y sensores táctiles en las yemas de los dedos, estos sensores están formados por microsensors formando una malla, dando mayor sensibilidad al agarre de la mano. La comunicación de los sensores se realiza mediante el bus CAN.

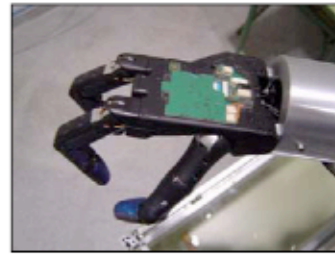


Figura 6. Mano SHADOW

3.2 Interconexión

La interconexión de los distintos elementos con la plataforma se realiza mediante distintos buses, estando entre ellos el bus CAN y el bus AER.

3.3 Aplicación

Estando actualmente en desarrollo, en SAMANTA II se pretende poner en funcionamiento la biblioteca de gestos para el agarre de objetos que se realizó en SAMANTA, la utilización de la mano SHADOW es una mejora bastante considerable debido a la mayor integración de la sensorización táctil, con respecto a la Cervantes.

4 El objetivo final de SAMANTA

Como objetivo final, en un futuro cercano, se pretende ampliar la plataforma con otro brazo-mano, construir un cabezal estereoscópico que funcione acorde a la tecnología AER, un sistema electromecánico que se asemeje al movimiento del cuello humano y un torso que sirva como base de todo el conjunto. Todos los componentes de la plataforma funcionando bajo el bus AER.

4.1 Elementos

A continuación se enumeran los elementos que formarían la nueva plataforma:

- Dos brazos robot Robotnik
- Dos manos antropomorfas
- Plataforma basada en PC, bajo sistema operativo de libre distribución Linux.
- Cabezal estereoscópico AER
- Base electromecánica con movimiento de cuello
- Base para alojar todos los elementos electromecánicos, con forma de torso humano

4.2 Interconexión

Todos los componentes estarán conectados al bus AER y serán monitorizados y controlados a través de este bus, mediante un PC que dispondrá de un sistema integrado gráfico bajo Linux. Este sistema monitorizará y permitirá el control de los elementos de la plataforma.

4.3 Aplicación

Uno de los propósitos más importantes en esta última fase sería la demostración de la velocidad y versatilidad del bus AER, en aplicaciones que requieran gran velocidad en el movimiento, por ejemplo:

- Jugador de ping-pong.
- Reconocimiento e inserción de piezas cilíndricas dentro de un anillo a alta velocidad y con tolerancias dimensionales ajustadas.

Otra de las aplicaciones que se busca en SAMANTA es su propia introducción al mundo industrial.

5 Conclusiones

SAMANTA se ha desarrollado como una plataforma en la que poder realizar experimentos de funcionalidad de algoritmos de inspiración biológica. En el mundo de la robótica, la manipulación de objetos de diversa forma, tamaño y peso es una tarea compleja que aún se está estudiando en distintas partes del mundo. Partiendo de un entorno experimental dentro de los laboratorios, SAMANTA quiere ampliar su aplicación intentando abrirse un hueco en el entorno industrial.

El bus AER.

AER (Address-Event Representation) nace en los laboratorios de Caltech en 1991 por Silvestri y Mahowald. Nace como un protocolo asíncrono de comunicación inter-chip para replicar de forma continua en el tiempo el estado de un array de neuronas de un chip a otro chip.

El concepto de neurona aquí se puede extrapolar al de pixel, por tanto se puede utilizar para replicar el estado de un conjunto de píxeles en un dispositivo CCD.

Cada neurona (o pixel) codifica su estado como la frecuencia de una secuencia de impulsos (eventos). Los impulsos generados asincrónicamente por un array de píxeles se arbitran y transmiten a un bus digital inter-chip de alta velocidad. En dicho bus aparece la "dirección" del pixel que originó dicho evento. En dicho bus, cada evento asíncrono se transmite en pocos nano-segundos (en los más rápidos que hay actualmente el tiempo es de 15ns). Por otra parte, la frecuencia con la que un pixel genera eventos es del orden de KHz o inferior (del orden de como mucho milisegundos), lo que permite multiplexar la actividad de más de 50000 píxeles.

Agradecimientos

Este es un proyecto en el que han trabajado muchos soñadores y en el que seguirán trabajando muchos otros, es por ello por lo que quiero dar las gracias a todos los que han trabajado y a los que trabajarán en él.

Referencias

- [1] IST Workshop en biónica y neurorobótica, Facets of Neuro-IT. Lovaina, Belgica. 3 Diciembre 2002.
- [2] J. López Coronado, F. Díaz Pernas, F. Diez Higuera y R. Bazán Ocón. 'A Neural Network Application on Robotic for the Food Industry ...', Industrial Application of Neural Networks. F. Fogelman Soulie and P. Gallinari (Eds.), pp. 343-357, 1997. World Scientific IOS Press (ISBN-9051992807), Amsterdam- NL.
- [3] J.Molina, J. Feliu, J.Lopez Coronado, "Connectionist models of cortico basal ganglia adaptive neural networks during learning of motor sequential procedures", Lecture Notes in Computer Science, Berlin, Vol. 2084, pp. 394-401, 2001.
- [4] J.Molina, J.Feliu, J López Coronado, "A neural model of spatiotemporal coordination in prehension", Lecture Notes in Computer Science, Vol. 2015, pp. 9-14, 2002.
- [5] Philippe Gorce, Farid El Hafi y Juan López-Coronado, "Dynamic Control of Walking Cycle with Initiation Process for Humanoid Robot", Journal of Intelligent and Robotic Systems 31, pp. 321-337, 2001, Kluwer Academic Publishers, Netherlands.
- [6] F. García Córdova, J.Molina, J.Lopez Coronado. "A corticospinal network for control of voluntary movements of a physiologically based experimental platform". Lecture Notes in Computer Science. Pp. 216-222, 2002.

Revisión de los algoritmos anti-isla: Problemática asociada a la Generación Distribuida

Manuel Martínez-Tafalla, Fco Javier Cánovas y Fco de Asís Ruz
Dpto. Ingeniería Eléctrica, Universidad Politécnica de Cartagena
Campus Muralla del Mar. 30202 Cartagena
E-mail: mmml@alu.upct.es

Resumen. Este documento realiza una revisión de los algoritmos más usados actualmente para la detección del fenómeno de “isla”, un fenómeno eléctrico que se produce cuando una fuente de Generación Distribuida (GD) continúa energizando una parte de la red después de que dicha porción de red haya sido interrumpida o desconectada por diversas causas. A lo largo del artículo se establece la distinción entre los dos tipos de métodos existentes: pasivos (basados en la monitorización de determinados parámetros como tensión y frecuencia) y activos (introducen perturbaciones en el circuito y monitorizan la respuesta). Se analizan también las principales ventajas e inconvenientes de cada método y a modo de conclusión se recomienda el más adecuado.

1 Introducción

La aparición inesperada del fenómeno de “isla” es uno de los principales problemas para los sistemas pequeños de GD. La “isla” se produce cuando la potencia alimentada por la red es interrumpida pero la GD continua suministrando potencia a la línea de distribución. La desconexión de la red normalmente se produce como respuesta frente a un fallo. En el caso ideal, el fallo debería ser detectado por el sistema de protección de la GD y desconectarla antes de que se produzca la “isla”. La aparición de la “isla” en los inversores para la conexión a la red de la GD puede producirse como resultado de las siguientes situaciones:

- Un fallo detectado por la red y que deriva en la activación de un dispositivo de desconexión, pero que no es detectado por el inversor fotovoltaico o los dispositivos de protección.
- Desconexión accidental del suministro normal de la red por fallos en los equipos.
- Cambios repentinos en la red de los sistemas de distribución y cargas.
- Desconexiones intencionadas de la línea para servicios de mantenimiento, bien en un punto de la red, bien en la entrada del servicio.
- Errores humanos o vandalismo.
- Un accidente natural.

Hay muchas razones por las cuales la “isla” debe ser prevista tanto en sistemas fotovoltaicos como en cualquier otro tipo de generación de energía con conexión a red. Seguridad, responsabilidad y mantenimiento de la calidad de la energía suministrada a los consumidores son algunas de las principales.

Una disposición típica donde se pueden aplicar los algoritmos a estudio es la mostrada en la Figura 1. El sistema consiste en un equipo de generación fotovoltaico y un inversor.

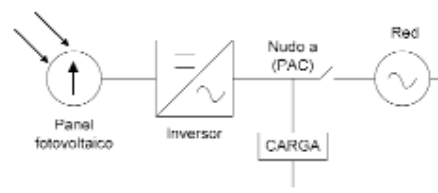


Figura 1: Configuración esquemática del sistema

La fuente de tensión de la red eléctrica está representada a la derecha y existe también un interruptor que permite aislar la red del equipo. El nodo “a” es el “punto de acoplamiento común” (PAC) o punto de conexión entre la carga del usuario y el sistema de red.

2 Métodos de protección anti-isla

Por todo lo comentado anteriormente, la detección del fenómeno de “isla” es una característica imprescindible para cualquier sistema de GD, durante los últimos años se han propuesto y se han desarrollado numerosos métodos de protección anti-isla, que podemos agrupar en cuatro categorías principales: pasivos con inversor permanente, activos con inversor permanente, activos sin inversor permanente y métodos basados en el uso de las comunicaciones entre la red y el inversor fotovoltaico. Nuestro estudio se va a centrar en los métodos pasivos y activos con inversor permanente.

2.1 Métodos pasivos

Los métodos pasivos son aquellos que basan la detección en la monitorización de parámetros seleccionados como tensión y frecuencia y/o sus características, e interrumpen la conversión de energía por parte del inversor cuando se produce una transición fuera de los límites establecidos para estos parámetros.

Un concepto imprescindible en el estudio de los sistemas de detección anti-isla es la “zona de no detección” (ZND), dicha zona representa el rango en el que los esquemas de detección anti-isla probados fallan al detectar la “isla”. Su definición se basa en términos de concordancia de potencias entre el inversor de GD y la carga. La ZND se usa como índice para evaluar los diferentes algoritmos anti-isla y el objetivo de todo método de detección de “isla” es conseguir que dicha ZND sea cero o esté lo más próxima a éste.

2.1.1 Sobre/sub tensión y sobre/sub frecuencia

Todos los sistemas fotovoltaicos con conexión a la red precisan de métodos de protección de sobre/sub tensión (over/under voltage protection, OVP/UVF o directamente OUV) y de sobre/sub frecuencia (over/under frequency protection, OFP/UFP o directamente OUF) que hacen que el inversor cese de suministrar potencia a la red si la frecuencia o la amplitud de la tensión en el PAC entre el usuario y la red se salen de los límites establecidos.

Estos métodos tienen un bajo coste y son necesarios por diversas razones de seguridad. Aparte de la prevención del efecto “isla”, también son necesarios porque algunos otros métodos de prevención anti-isla producen alteraciones en la tensión o la frecuencia y confían en los OUV y OUF para desactivar el inversor. Su principal inconveniente es su gran ZND. Los OUV y OUF son incapaces de detectar la existencia de la “isla” cuando la potencia proporcionada por el sistema fotovoltaico coincide con la consumida por las cargas. Además, los tiempos de respuesta de estos métodos pueden ser muy variables e impredecibles.

2.1.2 Detección de armónicos de tensión y armónicos de corriente

En este método, el inversor fotovoltaico monitoriza la distorsión armónica total [THD (*Total Harmonic Distortion*)] de la tensión en el PAC y se desconecta si esta THD supera un cierto límite. Bajo condiciones normales de operación, la tensión en el PAC es la tensión de la red, por lo que la distorsión es prácticamente nula ($THD \approx 0$). Cuando la red está conectada, la corriente armónica inyectada por el inversor circula a través de la pequeña impedancia de la red, y puesto que la impedancia de la red es muy pequeña, la distorsión que aparece en la tensión del PAC también lo es.

Al producirse una situación de “isla”, los armónicos de corriente producidos por el inversor se transmiten a las cargas, que en general presentan una impedancia mayor que la de la red. Al interactuar la corriente armónica con una impedancia elevada de las cargas, en el PAC se generarán armónicos de tensión que pueden ser detectados por el inversor, indicando que se ha producido una situación anómala o de “isla”.

El problema de este método es que es muy sensible a las perturbaciones que pueda experimentar el sistema, independientemente si su origen deriva de una desconexión de la red. Además es difícil establecer los límites de THD, ya que las cargas pueden ser puramente resistivas, en cuyo caso no lo detectaría, o no lineales, en cuyo caso la distorsión en el PAC sería elevada incluso con la red conectada. La ZND de los métodos basados en los armónicos está estrechamente ligada con la carga y en el caso de grandes variaciones de la amplitud de los armónicos, estos métodos tienen una ZND pequeña.

2.1.3 Método de monitorización de fase

Bajo condiciones normales de operación (el inversor no produce componente de potencia reactiva) no hay desplazamiento de fase entre la tensión y la corriente en los terminales de salida del sistema fotovoltaico, por tanto la corriente de referencia para el control del inversor se sincroniza con la tensión fundamental en el PAC.

La variación de la frecuencia de la tensión como consecuencia de la “isla” provoca un cambio en el vector tensión en comparación con el eje d (sistema d-q-o) y la consecuente variación de fase. El ángulo detectado se almacena y se compara con el valor medido tras un ciclo completo, la fase de salida es una rampa con una cierta pendiente. Un cambio en la frecuencia produce una alteración de la pendiente que puede ser detectada. La respuesta del método depende mucho de los elementos de potencia reactiva. La ZND de este método es la misma que la de los métodos de sobre/sub frecuencia (OUF).

En la tabla siguiente resumimos las principales características de los métodos pasivos:

Método anti-isla	Ventajas	Inconvenientes
OVP/UVF y OFP/UFP	Bajo coste	ZND grande No detectan si $P \approx P_{carga}$ t_r (tiempo de respuesta) variable e impredecible
Detección de armónicos de tensión	$t_r = 0,1 \div 0,2s$ Ausencia de ZND	Susceptible a perturbaciones Difícil definir los límites de THD
Monitorización de fase	$t_r = 0,1 \div 0,2s$	ZND grande Dependen de los elementos de potencia reactiva

Tabla 1: Resumen de los métodos anti-isla pasivos

2.2 Métodos activos

Los métodos activos son aquellos que introducen perturbaciones intencionadamente en el circuito y después monitorizan la respuesta para determinar si la red pública con su tensión, frecuencia e impedancia está aún conectada. Si la pequeña perturbación es capaz de afectar a los parámetros en el PAC según determinados requisitos, el circuito activo obliga al inversor a cesar la conversión.

2.2.1 Inyección de armónicos/Detección de impedancia

Este método es un caso especial de los métodos de monitorización de armónicos. La diferencia y la razón por la cual este método se considera más activo que pasivo es que inyecta una corriente de armónicos a una frecuencia específica intencionadamente en el punto PAC a través del inversor fotovoltaico.

Cuando la red está conectada, si la impedancia de la red es menor que la impedancia de la carga a la frecuencia armónica, entonces la corriente armónica circula por la red y no se detecta ninguna anomalía en la tensión. Con la desconexión de la red, la corriente armónica circula por la carga, que produce una tensión armónica que puede ser detectada.

2.2.2 Métodos de variación de la potencia activa y reactiva

El control del inversor fotovoltaico conectado a la red se obtiene a través de la potencia de referencia (P_{GD}) considerada constante, pero que en la realidad puede variar u oscilar con las condiciones de temperatura e irradiación. Se considera que la carga absorbe constantemente la misma potencia (P_{carga}).

En la condición de “isla”, la variación real de potencia fluye directamente en la carga, afectando la corriente del inversor y la tensión en el punto PAC. Se puede calcular la variación de tensión frente a la variación de potencia inyectada por el inversor en la carga durante la condición de “isla”.

Es posible variar la potencia activa del inversor fotovoltaico para desplazar la amplitud de la tensión fuera del rango normal de operación pero es necesario elegir cuándo inyectar la potencia porque una variación continua de la potencia inyectada se opone a la búsqueda del punto de máxima potencia (PMP). Por esta razón, el método se basa en la variación de la potencia inyectada sólo cuando la tensión medida en el punto PAC exceda un cierto valor umbral.

Los diagramas de fases de dichos algoritmos serían los siguientes:

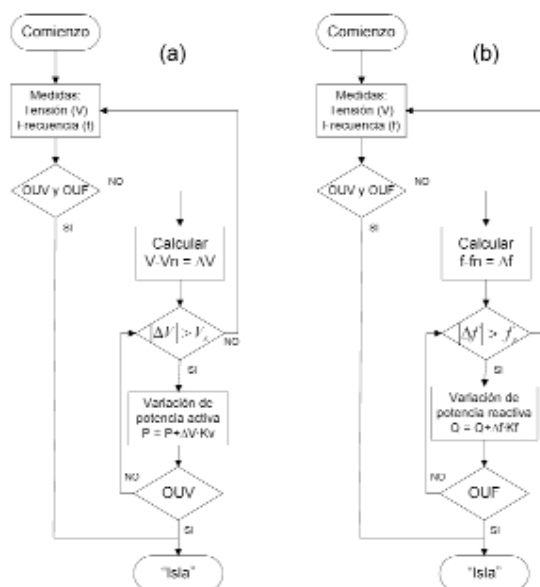


Figura 2: Algoritmos de inyección de potencia activa (a) y reactiva (b)

2.2.3 Métodos de variación de la impedancia de la red (ENS o MSD)

Este método se basa en la detección de la impedancia de la red. Consiste en una instalación formada por dos dispositivos de monitorización en paralelo, conectados a sendos dispositivos de interruptores en serie y controlados de manera independiente. Cada una de estas unidades independientes monitoriza de manera continuada la tensión, frecuencia e impedancia de la red. El circuito está diseñado para detectar cambios significativos en la impedancia en periodos cortos de tiempo, como es el caso de las caídas de red.

Entre las ventajas de este método figuran su reducida ZND (gran efectividad), su diseño redundante de monitorización de tensión y frecuencia y su propia auto-evaluación regular. El principal inconveniente que presenta es la alta probabilidad de interferencias con otros dispositivos e incluso con la propia red. Otra desventaja importante de este método es el aumento del ruido armónico inyectado en la red por el inversor. Para limitar este inconveniente, se recomienda inyectar la corriente armónica o interarmónica sólo durante el tiempo necesario para la elaboración numérica de los datos. Además, si hay varios convertidores conectados en paralelo pueden ocasionarse problemas con la efectividad del método y con la calidad de la potencia, lo que implica dificultades en el control y la estabilidad del sistema.

2.2.4 Método basado en crear desfases de frecuencia o de fase (SMS o APS)

Este método, conocido como “Slip-mode frequency shift” (SMS) o “Active Phase Shift” (APS), se basa en un circuito phase-shift-loop (PSL) que continuamente provoca pequeños cambios en el factor de potencia por encima y debajo de la unidad.

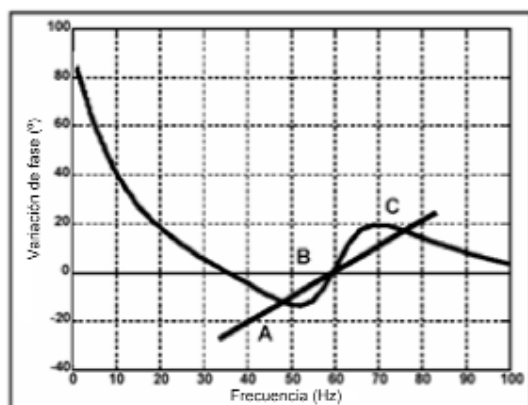


Figura 3: Trazo del ángulo de fase corriente-tensión frente a la frecuencia de un inversor que utiliza el método SMS

Normalmente los inversores fotovoltaicos operan con factores de potencia unitarios, de modo que el ángulo de desfase entre la corriente de salida del inversor y la tensión en el PAC se controla para que tienda a cero.

Con el método SMS, el ángulo de desfase entre la tensión y la corriente se establece como función de la frecuencia de la tensión en el PAC. Si la red se desconecta y se produce una pequeña perturbación en la frecuencia del PAC, la forma de la curva de la respuesta de la fase del inversor hace que el error se incremente, de manera que la perturbación crece. Este mecanismo de realimentación hace que el sistema se desplace a un nuevo punto de funcionamiento A o C (Figura 3), en función de la dirección de la perturbación, detectándose el fallo.

Entre las ventajas de este método se encuentran su facilidad de implementación, su alta eficiencia anti-isla (pequeña ZND), y su moderada influencia en el resto del sistema. El aspecto negativo es la reducción de la calidad la potencia del inversor.

2.2.5 Método basado en crear cambios en la frecuencia (AFD)

En este método, más conocido como "Active Frequency Drift" (AFD), la forma de onda de la corriente inyectada en el PAC por el inversor fotovoltaico está ligeramente distorsionada, de modo que existe una tendencia constante a cambiar la frecuencia. Cuando está conectado a la red eléctrica es imposible que la frecuencia cambie, pero si se desconecta de la red la frecuencia se ve forzada a fluir arriba o abajo, aumentando el flujo de frecuencia causado por el sistema al buscar la frecuencia de resonancia de la carga, este proceso continúa hasta que la frecuencia supera los límites establecidos y es detectada por las protecciones OFP/UFP.

La ventaja de este método es su fácil implementación en los microcontroladores, pero entre los aspectos negativos están la degradación de la calidad de

potencia en el inversor y la probabilidad de causar interferencias de radiofrecuencia (RFI).

2.2.6 Variación de la frecuencia según Sandia (SFS)

El "Sandia Frequency Shift" (SFS) es una extensión acelerada del método AFD, y es otro de los métodos que usa realimentación positiva para prevenir la "isla". En este caso la realimentación se aplica sobre la frecuencia de la tensión en el PAC. Cuando la red está conectada, el método detecta los pequeños cambios de frecuencia e intenta aumentar estos cambios, pero la estabilidad de la red se lo impide. Al desconectarse la red, si la frecuencia en el PAC aumenta, el error de fase también y hace que el inversor aumente su frecuencia, reforzando la desviación en un proceso repetitivo hasta alcanzar el umbral del OFP. El proceso es similar cuando la frecuencia decrece.

Es un método fácil de implementar y tiene una de las menores ZNDs de entre todos los métodos activos. Al igual que el método SMS, proporciona un buen compromiso entre la efectividad de la detección de "isla", la calidad de potencia de salida y los efectos de la respuesta transitoria del sistema. Entre las principales desventajas figura que requiere que se reduzca ligeramente la calidad de potencia de salida del inversor cuando se conecta a la red, ya que la realimentación positiva amplifica los cambios que se producen en la red. También es posible que la inestabilidad en la calidad de potencia del inversor pueda causar un comportamiento transitorio indeseable en el sistema. En este método la forma de onda de referencia es bastante sensible a ruido o armónicos.

2.2.7 Variación de la tensión según Sandia (SVS)

Este método, conocido como "Sandia Voltage Shift" (SVS), utiliza una realimentación positiva aplicada a la amplitud de la tensión en el PAC. Si se produce un decremento en la amplitud de v_n (de la Figura.1) el inversor reduce su corriente de salida y por tanto su potencia de salida. Cuando la red se desconecta y se produce una disminución en la tensión, se produce una disminución adicional en la amplitud de la tensión que hace que la corriente de salida del inversor también disminuya, lo cual finalmente conduce a una reducción en la tensión que puede ser detectada por el UVP. Es posible aumentar o disminuir la potencia de salida del inversor, conduciendo tanto a OVP como a UVP.

En inversores basados en microcontroladores este método es fácil de implementar y es considerado el más efectivo de entre los métodos de prevención de "isla" con realimentación positiva. Tiene dos pequeños inconvenientes: que requiere una reducción de la calidad de potencia de salida y que hay indicios de que este método puede tener un pequeño impacto

en la respuesta transitoria y calidad de potencia del sistema público.

En la tabla mostrada a continuación se resumen las ventajas e inconvenientes de los métodos activos:

Método anti-isla	Ventajas	Inconvenientes
Inyección de armónicos / Detección de impedancia	Detecta la "isla" usando sólo monitorización PLL Ausencia de ZND	La amplitud de la tensión armónica depende de la carga Problemas si hay varios inversores conectados
Variación de potencia activa	$t_i (K_v = 5) = 0,45s$ $t_i (K_v = 5) = 0,3s$ Ausencia de ZND	Caso "ideal"
Variación de potencia reactiva	$t_i (K_r = 50) = 0,75s$ $t_i (K_r = 10) = 0,65s$ Ausencia de ZND	Caso "ideal"
SMS	Fácil de implementar ZND pequeña Influencia moderada en el resto del sistema	Reducción de la calidad de la potencia del inversor
AFD	Fácil implementación en microcontroladores	Degradación de la calidad de potencia en el inversor Probabilidad de causar interferencias de radiofrecuencia
SFS	Una de las menores ZND Buen compromiso entre efectividad, calidad de potencia y efectos de la respuesta transitoria	Se reduce ligeramente la calidad de la potencia de salida y esto podría ocasionar un comportamiento transitorio indeseable en el sistema
SVS	Fácil de implementar en microcontroladores Método más efectivo de realimentación positiva	Reducción de la calidad de potencia de salida Pequeño impacto en la respuesta transitoria y calidad de potencia
ENS	Reducida ZND Diseño redundante de monitorización de tensión y frecuencia Auto-evaluación regular	Alta probabilidad de interferencias con otros dispositivos y con la propia red

Tabla 2: Resumen de los métodos anti-isla activos

2.2.8 Métodos de detección de "isla" a nivel de red

A. Método de conexión de impedancia

Este método anti-isla se usa normalmente en la línea de la red distribución como una protección de seguridad. Específicamente consiste en la instalación de una impedancia de bajo valor, normalmente un condensador en la red del sistema, dentro de la "isla" potencial (Figura 4)

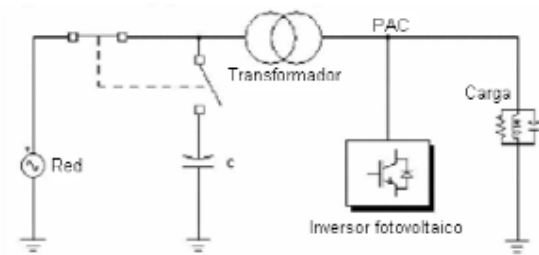


Figura 4: Método basado en la conexión del condensador

El valor de la potencia reactiva absorbida por el condensador determina los diferentes tiempos de sobre o sub frecuencia durante la operación de protección anti-isla. La inserción de impedancia es altamente efectiva en la prevención de "islas", pero es más cara que otros métodos, ya que es necesario hardware adicional en el lado de la red del PAC. El retardo en el tiempo de inserción provoca un incremento en el tiempo de detección de la "isla" y ello puede dar lugar a que surjan problemas al instalar el sistema fotovoltaico de generación distribuida en diferentes periodos de tiempo. Este hecho podría dar lugar a la necesidad de una modificación del banco de condensadores.

B. Métodos basados en la comunicación entre la red y el inversor fotovoltaico

El procedimiento consiste en instalar un transmisor cerca de la línea de protección y un receptor en el punto PAC en las proximidades del inversor. El sistema usa una línea PLCC (*Power line carrier communications*) cuyo soporte es la línea eléctrica de potencia.

Bajo condiciones normales de operación una señal energética más débil se envía al receptor. Cuando se produce un fallo o una interrupción intencionada del servicio provoca la desconexión de la red, el canal de comunicaciones es obligado a interrumpir la transmisión de datos y provoca la parada del inversor. Se puede conseguir el mismo objetivo con una línea dedicada a la comunicación basada en SPD [*Signal produced by disconnect* (señal producida por una desconexión)]

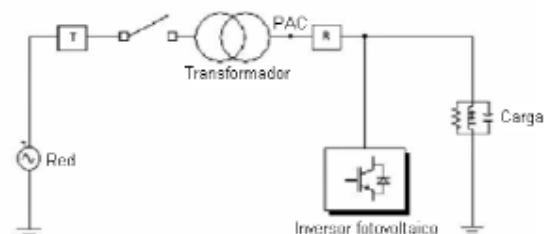


Figura 5: Método anti-isla basado en la comunicación del inversor de la red

La tabla siguiente muestra de manera esquemática las principales características de los métodos de detección de “isla” a nivel de red:

Método anti-isla	Ventajas	Inconvenientes
Conexión de impedancia	Efectividad alta	Coste más elevado (hardware adicional) Tiempo de detección algo elevado (por el retardo) 0,3 s. con $Q_c = 100 \text{ VAr}$ 0,4 s. con $Q_c = 50 \text{ VAr}$
Comunicación red-inversor	Comunicación constante	Coste más elevado (hardware adicional)

Tabla 3: Resumen de los métodos anti-isla a nivel de red

3 Conclusiones

Tras el estudio de los diferentes métodos actuales consideramos que la opción más efectiva es la implementación conjunta de los métodos SFS y SVS, con esta combinación obtenemos un buen control tanto de la tensión como de la frecuencia con una ZND pequeña, además prácticamente no se reduce la calidad de la potencia de salida y los efectos de la respuesta transitoria no son excesivamente importantes.

Referencias

- [1] F. De Mango, M. Liserre, A. Dell'Aquila, A. Pigazo. “Overview of Anti-Islanding Algorithms for PV Systems. Part I: Passive Methods”, IEEE, pp. 1878-1883, (2006).
- [2] F. De Mango, M. Liserre, A. Dell'Aquila, A. Pigazo. “Overview of Anti-Islanding Algorithms for PV Systems. Part II: Active Methods”, IEEE, pp. 1884-1889, (2006).
- [3] C. Dai. “A study of voltage regulation and islanding associated with distributed generation”, December (2007)
- [4] D. Treballe. “La generación distribuida en España”, Tesis ICAI (2006).
- [5] M. Pietzsch. “Convertidores CC/CA para la conexión directa a la red de sistemas fotovoltaicos”, Universidad Politécnica de Cataluña (2005)

Síntesis de nanopartículas pseudoesféricas monodispersas de magnetita con diámetro modal inferior a 50 nm

E. Luna, S. A. Gómez-Lopera*

Dep. de Física Aplicada, Universidad Politécnica de Cartagena (UPCT)

Campus Alfonso XIII, 30203 Cartagena (Spain)

*Teléfono: +34 968 32 55 99 Fax: +34 968 32 53 37

*E-mail: salvador.glopera@upct.es

Resumen. En este trabajo se ha realizado estudio previo acerca de la síntesis y caracterización geométrica de nanopartículas de magnetita (Fe_3O_4). El objetivo es obtener nanopartículas con un diámetro modal inferior a 50 nm y con forma pseudoesférica, para poder ser empleadas como sistemas de liberación controlada de fármacos. Los resultados indican que las partículas obtenidas tienen un diámetro modal de 38 ± 11 nm, forma pseudoesférica y son razonablemente monodispersas.

1 Introducción

Actualmente, y gracias a las múltiples aplicaciones industriales y biomédicas, el estudio de los coloides ha recobrado una gran importancia, principalmente el de aquellos formados por partículas sólidas monodispersas de tamaño nanoscópico. Entre la gran cantidad de propiedades que se pueden estudiar en estos sistemas, se encuentran las propiedades ópticas, acústicas, de estabilidad y de su comportamiento frente a campos externos. En particular, el comportamiento electrocinético (principalmente las medidas de movilidad electroforética) o la conductividad de la suspensión completa, se consideran hoy día como características distintivas propias de estos materiales. Dentro de los campos tecnológicos en los que las aplicaciones coloidales se han hecho realidad en los últimos años podemos destacar, la tecnología de portadores magnéticos (TPM), que es justo aquel en el que está centrado este trabajo. En concreto, hemos realizado la síntesis de nanopartículas pseudoesféricas monodispersas de magnetita mediante la conocida técnica sol-gel, según describen Sugimoto y Matijević [3].

Como indican Gómez-Lopera et al. [2], una de las aplicaciones más importantes, es el empleo de las partículas con propiedades magnéticas como sistemas de liberación de fármacos. Ello es debido a su respuesta a un campo magnético externo que puede conducir la partícula al lugar deseado y mantenerla durante el período de tiempo requerido.

2 Método experimental

2.1 Materiales

Todos los reactivos químicos utilizados fueron de calidad analítica de la casa Panreac (Spain). El agua utilizada fue de calidad Milli-Q (Milli Academic,

2.2 Síntesis de las nanopartículas de magnetita

El método para la obtención de magnetita coloidal fue originalmente propuesto por Sugimoto y Matijević [3]. Dicho método se basa en la cristalización de un gel amorfo de hidróxido ferroso. La preparación del mismo se consigue mediante el mezclado de dos disoluciones de partida formadas con KOH, KNO_3 y $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ en concentraciones adecuadas. Para que no se obtenga simultáneamente otro tipo de partículas distintas a la magnetita, ha de purgarse con nitrógeno las disoluciones antes de mezclarlas. La síntesis finaliza con el envejecimiento del gel durante 4 h a 90°C en un horno de convección (Mettmert, Alemania).

En nuestro caso, se trabajó con un volumen final de 250 ml de la disolución con el gel. Las concentraciones de las distintas especies químicas empleadas fueron las siguientes en esta disolución: 0.05 M de KOH, 0.2 M de KNO_3 y 0.026 M de $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, lo que corresponde a un exceso de iones ferroso de 1mM.

Finalmente, se limpió las partículas por sedimentación magnética y fueron almacenadas, después de su secado, hasta su uso posterior en los experimentos de microscopía.

2.3 Caracterización geométrica: forma y tamaño

La caracterización geométrica de las partículas obtenidas se realizó utilizando microfotografías realizadas con un microscopio electrónico de transmisión -TEM- (JEM-2100/HR, Jeol Ltd., Japón), y con un microscopio electrónico de barrido -SEM- (HITACHI S-3500N, Hitachi Ltd., Japón).

3 Resultados y discusión

3.1 Geometría: forma

La Figura 1 muestra dos microfotografías obtenidas con el TEM. En la Figura 2 se muestra una microfotografía obtenida con el SEM. Esta última imagen es muy ilustrativa porque se observan claramente los aglomerados tridimensionales formados por las partículas magnéticas.

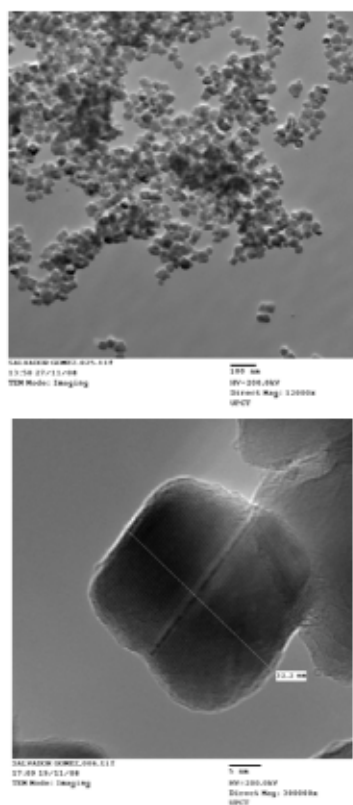


Fig. 1 Microfotografías de transmisión de las nanopartículas de magnetita.

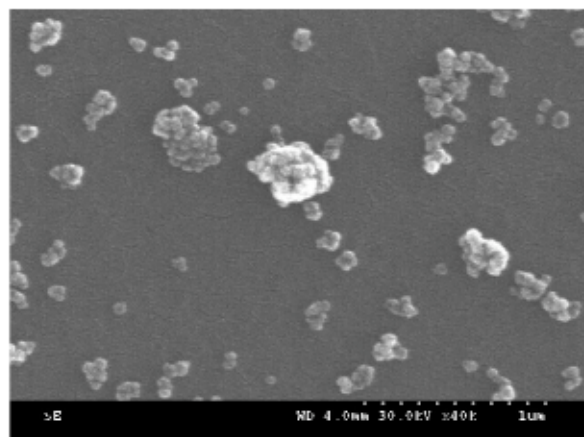


Fig. 2 Microfotografía de barrido de las nanopartículas de magnetita

Como se observa claramente, la forma de las nanopartículas obtenidas es seudo esférica, existiendo también, pero en menor número, partículas con forma pseudocúbica (véase el detalle de la imagen inferior de la Figura 1). También puede apreciarse en dicha imagen los planos cristalinos de la magnetita.

3.2 Geometría: tamaño

En las Figuras 1 y 2 se comprueba que el diámetro de todas las partículas es inferior a 100 nm. El cálculo del tamaño medio del coloide sintetizado (diámetro modal) se realizó mediante un recuento manual sobre las microfotografías obtenidas. Para ello, se midió el diámetro mayor de las partículas teniendo la precaución de incluir todos los objetos, tanto grandes como pequeños. En la Figura 3 se muestra el histograma resultante.

Para describir la distribución real de tamaños utilizamos una función de distribución. El éxito de esta aproximación al problema radica en la elección de una función de distribución de dos parámetros apropiada. Siguiendo las indicaciones de Delgado y Matijević [1], la ecuación que mejor describe la distribución real de tamaños de los sistemas coloidales (diámetro D) es la distribución normal logarítmica, cuya expresión matemática es

$$p(D) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot D \cdot \sigma_g} \cdot e^{-\frac{\left[\ln \frac{D}{D_M}\right]^2}{2\sigma_g^2}}$$

En la Figura 3 se incluye también un ajuste de la curva descrita por esta función de distribución a los datos del histograma. A partir del mismo es inmediato encontrar que el diámetro modal de las partículas es de 38 ± 11 nm, diámetro que representa el tamaño medio de las partículas que conforman el sistema.

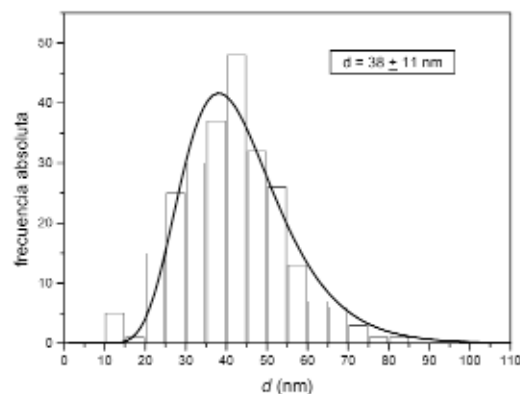


Fig. 3 Distribución Normal Logarítmica de las nanopartículas obtenidas.

Por otro lado, las nanopartículas son bastante monodispersas, lo cual queda patente en las microfotografías así como en el histograma de tamaños.

4 Conclusiones

Utilizando la técnica sol-gel, se ha conseguido obtener nanopartículas seudoesféricas de magnetita con un diámetro modal de 38 ± 11 nm. El coloide es razonablemente monodisperso, por lo que es un buen candidato a emplear como vehículo de transporte de fármaco, dado que es posible predecir su comportamiento al poder aplicarle la teoría electrocinética más avanzada para partículas esféricas.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado dentro de los proyectos MAT2005-07746-CO2-01 y CGL2007-66861-C04-04/HID, MEC (Spain).

Referencias

- [1] Delgado, A., Matijević, E., "Particle Size Distribution of Inorganic Colloidal Dispersions: a Comparison of Different Techniques", *Particle & Particle Systems Characterization*, pp. 128-135, vol. **8**. ISSN: 0934-0866 (1991)
- [2] Gómez-Lopera, S.A., Plaza, R.C., Delgado, A. V., "Synthesis and Characterization of Spherical Magnetite/Biodegradable Polymer Composite Particles", *Journal of Colloid and Interface Science*, pp. 40-47, vol. **240**. ISSN: 0021-9797 (2001).
- [3] Sugimoto, T., Matijević E., "Formation of Uniform Spherical Magnetite by Crystallization from Ferrous Hydroxide Gels"(1980), *Journal of Colloid and Interface Science*, pp. 227-243, vol. **74**. ISSN: 0021-9797 (2001).

Análisis cualitativo del flujo fásico de un sistema Manev en un sistema de referencia rotante.

F. S. Jiménez, M. C. Balsas and J. A. Vives

Departamento de Matemática Aplicada y Estadística (UPCT)a

Avenida Dr. Fleming s/n

Antiguo Edificio del Hospital de Marina. 30202-Cartagena (Murcia)

E-mail: clena.jimenez@upct.es, mcarmen.balsas@upct.es, juanantonio.vives@upct.es.

Resumen. En este trabajo se describe el espacio de fases global de un sistema Manev en un sistema de referencia rotante. Describimos la dinámica hamiltoniana en las fibras donde el vector del momento angular total es constante, en ciertas variedades de movimiento que son invariantes. Finalmente, usando el teorema de Liouville-Arnold y un estudio particular de la aplicación momento en sus puntos críticos, obtenemos una completa clasificación de los diferentes conjuntos invariantes del espacio fásico. Los resultados de este trabajo pueden aplicarse en el estudio de la precesión de Mercurio, de manera que se usa mecánica clásica en lugar de utilizar mecánica relativista.

1 Introducción

Sabemos por las leyes de Kepler que, todos los planetas describen órbitas elípticas alrededor del Sol, algunas de las cuales son prácticamente circulares. En el caso de Mercurio debido a la gran excentricidad de su órbita, lo que ocurre es que ésta eclipse es muy pronunciada. La perturbación originada por el resto de los planetas del Sistema Solar hace que el perihelio, punto de la órbita del planeta que se encuentra más cercano al Sol, se mueva unos 43 segundos de arco por siglo. Entre 1924 y 1930, G. Manev [4] estudió la corrección al potencial atractivo newtoniano del tipo $v = \gamma/r - \varepsilon/(r^2)$, donde $\gamma = G(m_1, m_2)$, (G es la constante gravitatoria, m_1 y m_2 las masas de dos cuerpos que se atraen mutuamente y r la distancia que hay entre ellos). Lo que se pretende en este trabajo es dar un modo alternativo de estudiar la precesión de Mercurio usando mecánica clásica en lugar de mecánica relativista.

Consideremos ahora el objeto de nuestro estudio. En algunas variedades invariantes del movimiento, tenemos el siguiente hamiltoniano $H: E \rightarrow \mathbb{R}$, dado por:

$$\Pi = \frac{1}{2} \left(p_r^2 + \frac{p_\theta^2}{r^2} \right) + \alpha p_\theta - \frac{1}{r} + \frac{\beta}{r^2},$$

donde $-1/r + \beta/r^2$, es el potencial de Manev y el término αp_θ añade a la dinámica del problema de Kepler el efecto asociado a la rotación del sistema de referencia. Los parámetros $\alpha > 0$ y $\beta \in \mathbb{R}$ son dos constantes estructurales del sistema y $E = \mathbb{R}^+ \times S^1 \times \mathbb{R}^2$, es el espacio fásico.

Con idea de hacer un estudio cualitativo de la dinámica asociada al sistema hamiltoniano, de un modo parecido al que se hace en [2] y [3], consideramos los siguientes conjuntos:

$$E_h = H^{-1}(h) = \{(r, \theta, p_r, p_\theta) \in E : g(r, p_r, p_\theta) = h\},$$

$$J_k = \{z = (r, \theta, p_r, p_\theta) \in E : p_\theta = k\}, \quad I_{hk} = E_h \cap J_k$$

donde $E_h \approx g^{-1}(h)$ y $g: \mathbb{R}^+ \times \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$ está definida por $g(r, p_r, p_\theta) = H(r, \theta, p_r, p_\theta)$ con $g^{-1}(h)$ una superficie de $\mathbb{R}^+ \times \mathbb{R}^2$, denominada superficie de energía. Estos conjuntos son invariantes para el flujo asociado al hamiltoniano, siendo H y p_θ dos integrales primeras del movimiento, independientes y en involución.

Los principales resultados que se obtienen en este trabajo son: la descripción de la foliación del espacio fásico E por medio de los conjuntos de energía constante E_h ; la de los conjuntos E_h por medio de los conjuntos invariantes I_{hk} y por último la foliación de I_{hk} por medio del flujo del sistema hamiltoniano.

Estas foliaciones nos darán una buena descripción del espacio de fases cuando $(h, k) \in \mathbb{R}^2$ para los diferentes valores de $\alpha > 0$ y β .

La herramienta principal de este estudio es el teorema de Liouville-Arnold (véase [1] para más detalles). Éste nos permite estudiar la aplicación momento $(H, p_\theta): E \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^2$ en los valores regulares de ella. Cuando no estemos en condiciones de usar el teorema de Liouville-Arnold se hará un estudio particular de los conjuntos I_{hk} para cada uno de los

valores críticos $(h, k) \in \mathbb{R}^2$ de la aplicación momento. Estos valores corresponderán, bien a los puntos de equilibrio de H , bien a los valores donde $p_\theta = k$ es un máximo o un mínimo de la superficie de energía.

2 Función potencial. Regiones de Hill.

Las regiones de Hill están completamente caracterizadas por medio del potencial ampliado. El hamiltoniano en coordenadas polares-simplécticas puede escribirse como:

$$H = \frac{1}{2} \left(p_r^2 + \frac{1}{r^2} (p_\theta + \alpha r^2)^2 \right) + \nu,$$

donde $\nu = -\alpha r^2/2 - 1/r + \beta/r^2$ es el potencial ampliado.

Las regiones de Hill son aquellas regiones del espacio fásico donde existe movimiento real y están determinadas por medio de los puntos críticos de ν , que corresponden con las raíces reales positivas de la ecuación polinómica $\alpha^2 r^4 + r - 2\beta = 0$.

Usando el algoritmo de Sturm obtenemos la siguiente clasificación para la existencia de valores críticos (c.v.), estos dependen de los diferentes valores de $f = 2048\alpha^2\beta^3 - 27$ y β : Si $\beta > 0$ y $f > 0$, tenemos 0 c.v.; si $\beta > 0$ y $f = 0$, tenemos 1 c.v.; si $\beta > 0$ y $f < 0$, 2 c.v.; y si $\beta \leq 0$, 1 c.v.

Debido a la falta de espacio nos centraremos en el caso más relevante, esto es, cuando $\beta \leq 0$.

Para cada $h \in \mathbb{R}$, definimos las regiones de Hill $R(h)$ de I_h por $R(h) = \pi(I_h)$, donde $\pi: E \rightarrow \mathbb{R}^+ \times S^1$ es la proyección natural. Así pues, tenemos que $R(h) = \{(r, \theta) \in \mathbb{R}^+ \times S^1 : \nu \leq h\}$. Se puede observar que:

$$R(h) \approx \{r \in \mathbb{R}^+ : -\alpha^2 r^2/2 - 1/r + \beta/r^2 \leq h\} \times S^1$$

donde \approx denota el difeomorfismo entre dos variedades diferenciables.

3 Topología de las regiones de Hill

De ahora en adelante los valores del potencial ampliado, en cada uno de sus puntos críticos r_i , serán denotados por $h_i = \nu(r_i)$, $(i = 1, 2, 3)$. Los valores A_j , $(j = 1, \dots, 7)$, corresponderán a los puntos de intersección de la gráfica del potencial y la recta $\nu = h$.

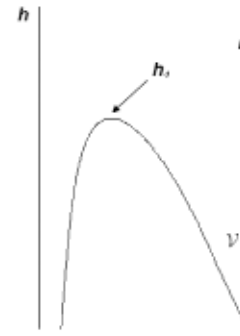


Fig. 1: Gráfica del potencial ampliado para $\beta \leq 0$, con h_i el punto crítico de ν .

Tabla 1: Clasificación topológica de las regiones de Hill, $R(h)$, para $\beta \leq 0$ y h_i punto crítico de ν .

$\beta \leq 0$ (véase Fig. 1)	
$h_i \leq h$	$R(h) \approx (0, +\infty) \times S^1$
$h < h_i$	$R(h) \approx [(0, A_1] \cup [A_2, +\infty)] \times S^1$

Con idea de hacer más claro el estudio de la topología de las regiones de Hill se presenta la siguiente figura: (véase Fig. 1)

Usando los resultados que se han obtenido previamente, la clasificación topológica de las regiones de Hill es la siguiente: (véase Tabla 1)

4 Estudio cualitativo del flujo hamiltoniano.

En esta sección estudiamos la topología de las variedades invariantes $H^{-1}(h) = E_h$ e $I_{h,k}$. Para poder dar esta clasificación necesitamos introducir la siguiente notación e incluir algunos nuevos resultados.

Nótese que $z_e = (r_e, \theta_e, p_r, p_\theta) \in E$ es un punto de equilibrio del flujo hamiltoniano si y sólo si $\tilde{z}_e = (r_e, \theta_e)$ es un punto crítico del potencial ampliado. Más aún, $\pi(z_e) = \tilde{z}_e$. Es por esta razón que cuando $\beta > 0$ y $f > 0$ el hamiltoniano no tiene equilibrios; si $\beta > 0$ y $f = 0$ el hamiltoniano tiene una familia de puntos de equilibrios; si $\beta > 0$ y $f < 0$ el hamiltoniano tiene dos. Finalmente, cuando $\beta \leq 0$ el hamiltoniano tiene una única familia de puntos de equilibrios. Así pues, podemos denotar a los valores del hamiltoniano H en cada uno de sus puntos de equilibrio de la misma manera que denotábamos el valor del potencial ampliado en cada uno de sus puntos críticos, es decir, por h_i , esto es $h_i = H(r_i, \theta_i, 0, p_{\theta_i})$, $(i = 1, 2, 3, 4)$.

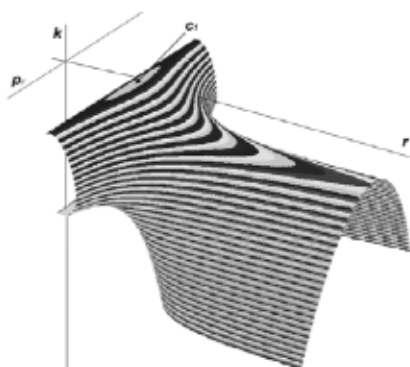


Fig. 2: Dibujo de la superficie $g^{-1}(h) = E_h / S^1$ para $\beta \leq 0$ con $h_2 < h$ (punto de equilibrio de H), $k = p_0$ y c_1 el valor de k correspondiente al extremo Q_1 .

Tabla 2: Clasificación topológica para E_h e I_{hk} para $\beta \leq 0$, donde h_2 es el punto de equilibrio de H .

$\beta \leq 0$			
h	E_h	I_{hk}	
$h_1 < h$	$S^3 \setminus \{S^1 \cup S^1\}$ (véase Fig. 2)	\emptyset	$c_1 < k$
		S^1	$k = c_1$
		$S^1 \times S^1$	$a_1 < k < c_1$
		$S^1 \times \square$	$k \leq a_1$
$h = h_2$	Y	\emptyset	$c_1 < k$
		S^1	$k = c_1$
		$S^1 \times S^1$	$a_1 < k < c_1$
		$S^1 \times \square$	$a_2 < k \leq a_1$
		$S^1 \times S^1$	$a_3 < k \leq a_2$
		$S^1 \times \square$	$k \leq a_3$
$h < h_1$	$\{S^3 \setminus S^1\} \cup \{S^3 \setminus S^1\}$	\emptyset	$c_1 < k$
		S^1	$k = c_1$
		$S^1 \times S^1$	$a_1 < k < c_1$
		$S^1 \times \square$	$a_2 < k \leq a_1$
		$S^1 \times S^1$	$c_2 < k \leq a_2$
		\emptyset	$c_3 < k \leq c_2$
		S^1	$k = c_3$
		$S^1 \times S^1$	$a_3 < k < c_3$
		$S^1 \times \square$	$k \leq a_3$

Usando el teorema de la función implícita se puede ver que los extremos de la superficie de energía son las raíces reales de la siguiente ecuación $2\alpha k^3 - 2hk^2 + 4\alpha\beta k - 4\beta h = 0$. Estas raíces las llama-

mos c_j y corresponden a los extremos de la superficie de energía que denotamos por $Q_j, (j=1,2,3)$. Las raíces reales respecto de $k, a_i, (i=1,2,3)$ de las ecuaciones $h - \alpha k = 0$ y $2\beta + k^2 = 0$, se obtienen aplicando el algoritmo de Sturm a la ecuación que nos da los extremos de la superficie de energía y nos delimitan aquellas regiones en las que están o no acotadas las órbitas.

Finalmente, S^{n-1} con $n > 1$, es la esfera de \square^n e Y es la unión de dos abiertos sólidos, identificándose punto a punto con dos círculos de cada toro que no pueden ser contraídos a un solo punto dentro del correspondiente toro (véase [3] para más información).

Veamos una de las figuras que corresponde a la superficie de energía: (véase Fig. 2)

Se obtiene la siguiente clasificación topológica para E_h e I_{hk} : (véase Tabla 2)

Para el caso en que $\beta = 0$ tenemos el problema de Kepler en un sistema de referencia rotante.

5 Conclusiones

En este trabajo hemos considerado sistemas Manev en un sistema de referencia rotante. Se ha descrito la dinámica hamiltoniana en las variedades invariantes E_h, J_k e I_{hk} , por medio del teorema de Liouville-Arnold y algunas técnicas específicas. Finalmente, se ha obtenido una completa clasificación topológica del espacio de fases asociado al sistema.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido posible gracias al Departamento de Matemática Aplicada y Estadística de la UPCT.

Referencias

- [1] V. I. Arnold et al. "Systems III (Encyclopaedia of Mathematical Sciences)". Springer Verlag, Berlin. (1978).
- [2] M. C. Balsas, E. S. Jiménez, J. A. Vera. "The Kepler Problem in Rotating Reference Frames: Topological Study of the Phase Flow" Conference Proceedings 963, 1146--1449. (2007).
- [3] J. Llibre et al. "Phase portraits of the two-body problem with Manev potential". J. of Physics A: Mathematical and General 34, 919--1934. (2001)
- [4] G. Manev. "Le gravitation et le principe de l'egalite de l'action et de la reaction". La, Comptes Rendues 178, 2159--2161. (1924).

El problema de Kepler en un sistema de referencia rotante. Estudio topológico del espacio fásico.

M. C. Balsas, E. S. Jiménez y J. A. Vives

Departamento de Matemática Aplicada y Estadística (UPCT)

Avenida Dr. Fleming s/n

Antiguo Edificio del Hospital de Marina. 30202-Cartagena (Murcia)

E-mail: mcarmen.balsas@upct.es, elena.jimenez@upct.es, juanantonio.vives@upct.es.

Resumen. En este trabajo se describe la dinámica hamiltoniana, en unas variedades invariantes del movimiento kepleriano en un sistema de referencia rotante. Por medio del teorema de Liouville-Arnold y un estudio particular de la aplicación momento en sus puntos críticos, obtenemos una completa clasificación del espacio fásico asociado a este sistema. Este problema modela numerosos tipos de movimientos de cuerpos como el movimiento de un satélite con respecto a un sistema de referencia situado en la tierra, el movimiento relativo de órbitas y el movimiento de satélites volantes en formación, esto es, los satélites múltiples que trabajan juntos en un grupo para lograr el objetivo de uno más grande, generalmente más costoso.

1 Introducción

El problema clásico de los dos cuerpos involucra el movimiento de un cuerpo alrededor de otro influenciados por su gravitación mutua, (ver [4]). Los ejemplos más comunes incluyen un satélite que se mueve en una órbita alrededor de un planeta, de un planeta que se mueve en una órbita alrededor de una estrella y de un electrón clásico que se mueve en una órbita alrededor de un núcleo atómico. Newton solucionó el problema considerando los dos cuerpos como masas puntuales. Algunos casos generalizados son más realistas, por ejemplo un cuerpo rígido y una masa puntual o dos cuerpos rígidos. Este trabajo presenta el estudio cualitativo del flujo de fases de un movimiento kepleriano en un sistema de referencia rotante.

Recientemente, Condurache y Martinusi han estudiado el problema de Kepler en sistemas de referencia giratorios (véase [2] y [3]). Condurache y Martinusi utilizan una regularización vectorial del tiempo y dan una solución exacta vectorial para este problema. La aportación de este trabajo es presentar una clasificación topológica del flujo de fases asociado a este sistema. Por medio del teorema de Liouville-Arnold y de un análisis particular de la aplicación momento, obtenemos la clasificación topológica completa del flujo. En este trabajo utilizamos técnicas similares a las usadas en [5].

Consideremos ya el objeto de nuestro estudio. En unas variedades invariantes del movimiento, la dinámica del sistema canónico viene descrita por la función hamiltoniana $H: E \rightarrow \mathbb{R}$ dada por

$$H = \frac{1}{2} \left(p_r^2 + \frac{p_\theta^2}{r^2} \right) + \alpha p_\theta - \frac{1}{r}$$

donde $\alpha > 0$ es una constante estructural del sistema y $E = \mathbb{R}^+ \times S^1 \times \mathbb{R}^2$, es el espacio de fases donde el hamiltoniano está definido.

Nótese que $H = H_{\text{Kepler}} + \alpha p_\theta$ donde H_{Kepler} representa el hamiltoniano de Kepler asociado al problema de los dos cuerpos y el término αp_θ , añade a la dinámica de Kepler el efecto asociado a la rotación del sistema de referencia.

Definimos $(H, p_\theta): E \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^2$, como la aplicación momento asociada al sistema. Decimos que el valor $(h, k) \in \mathbb{R}^2$ es un valor crítico para la aplicación momento si dicha aplicación no es diferenciable en ese valor, en caso contrario decimos que es un valor regular.

2 Dinámica hamiltoniana del sistema

Si queremos realizar un estudio cualitativo de la dinámica asociada al sistema hamiltoniano, debemos considerar los siguientes conjuntos:

$$E_h = H^{-1}(h) = \{(r, \theta, p_r, p_\theta) \in E: g(r, p_r, p_\theta) = h\},$$

$$J_k = \{z \in E: p_\theta = k\},$$

$$I_{hk} = E_h \cap J_k$$

siendo $z = (r, \theta, p_r, p_\theta)$ y $E_h \approx g^{-1}(h)$, donde \approx denota "difeomorfo a" y $g^{-1}(h)$ es una superficie de $\|\cdot\|^2$, denominada superficie de energía. Estos conjuntos son denominados variedades de energía

constante, variedades de momento constante y variedades de energía-momento constante. Estas variedades son invariantes por el flujo hamiltoniano del sistema, ya que H y p_θ son dos integrales primeras independientes y en involución. Por tanto, el sistema hamiltoniano es integrable.

El teorema de Liouville-Arnold demuestra que, para los sistemas hamiltonianos integrables, los conjuntos invariantes asociados a las intersecciones de todas las integrales primeras independientes y en involución son genéricamente subvariedades del espacio de fases. Por otra parte, si el flujo en tales subvariedades es completo, entonces estas subvariedades son difeomorfas a la unión de cilindros generalizados y el flujo en ellos se conjuga a un flujo lineal. (Para más detalles sobre sistemas hamiltonianos y la prueba del teorema anterior véase [1] y [4].

Cuando no estamos bajo las hipótesis del teorema de Liouville-Arnold tenemos que hacer un estudio particular de los conjuntos invariantes para los valores críticos de la aplicación momento. Estos valores corresponden a los puntos de equilibrio de la aplicación momento o a los valores donde hay un máximo o un mínimo de la superficie de energía.

3 Regiones de Hill

Las regiones de Hill son regiones del espacio de fases donde ocurre el movimiento de todas las órbitas que tienen energía h . Estas regiones se caracterizan completamente por medio del potencial. Completando cuadrados en el hamiltoniano tenemos

$$H = \frac{1}{2} \left(p_r^2 + \frac{1}{r^2} (p_\theta + \alpha r^2)^2 - \frac{\alpha^2 r^2}{2} - \frac{1}{r} \right),$$

donde $\tilde{V}(r) = (-\alpha^2 r^2 / 2 - 1/r)$ es el potencial en coordenadas polares simplécticas.

Las regiones de Hill vienen determinada por los puntos críticos del potencial \tilde{V} , estos puntos críticos vienen dados por las raíces reales positivas de la ecuación $1 - \alpha^2 r^3 = 0$. Es fácil ver que esta ecuación tiene una única raíz real positiva que denotamos por r_c .

Para cada $h \in \mathbb{R}$ definimos las regiones de Hill $R(h)$ de I_h como $R(h) = \pi(I_h)$ donde $\pi: E \rightarrow \mathbb{R}^+ \times S^1$ es la proyección natural. Así pues, para cada $h \in \mathbb{R}$ la región de Hill está definida por

$$R(h) = \{(r, \theta) \in \mathbb{R}^+ \times S^1 : \tilde{V} \leq h\}$$

y es fácil comprobar que $R(h) = \{r \in \mathbb{R}^+ : \tilde{V} \leq h\} \times S^1$.

Tabla 1: Clasificación topológica de las regiones de Hill, donde h_c es el punto crítico del potencial.

$\forall \alpha$ (véase Fig. 1)	
$h < h_c$	$R(h) \approx [(0, A_1] \cup [A_2, +\infty)) \times S^1$
$h \geq h_c$	$R(h) \approx (0, +\infty) \times S^1$

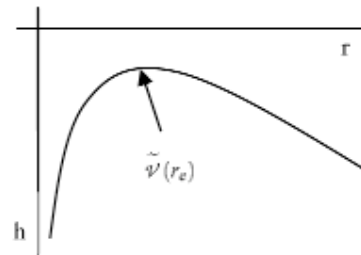


Fig. 1: Gráfica del potencial $\tilde{V}(r) = (-\alpha^2 r^2 / 2 - 1/r)$ donde $h_c = \tilde{V}(r_c)$ es el punto crítico de \tilde{V} .

Denotamos por $h_c = \tilde{V}(r_c)$ el valor del potencial en el punto crítico r_c . Los valores A_1 y A_2 son los puntos de intersección entre el gráfico del potencial y la recta $\tilde{V} = h$, usando los resultados anteriores, la clasificación topológica de las regiones de Hill se da en Tabla 1 y la gráfica de la función potencial se puede ver en Fig. 1.

4 Clasificación topológica del flujo de fases

En esta sección estudiamos la topología de los conjuntos invariantes E_h e $I_{h,c}$. Para dar la clasificación topológica de estos conjuntos necesitamos los siguientes resultados y notación.

Observe que $z_c = (r_c, \theta_c, p_r, p_\theta) \in E$ es un punto de equilibrio del flujo hamiltoniano si y solamente si $\tilde{z}_c = (r_c, \theta_c)$ es un punto crítico del potencial. Por otra parte, $\pi(z_c) = \tilde{z}_c$. Por esta razón, el flujo hamiltoniano tiene un único punto de equilibrio. Denotamos por $h_c = H(r_c, \theta_c, 0, p_{\theta_c})$ a dicho punto de equilibrio.

Para el cálculo de los extremos de la superficie de energía, usamos el teorema de la función implícita, obteniendo la ecuación $-1 - 2hp_0^2 + 2ap_0^3 = 0$, cuyas raíces reales determinan los máximos y mínimos de la superficie. Denotamos por $c_i, i = 1, 2, 3$ a estos extremos.

Tabla 2: Clasificación topológica de E_h e I_{hk} .

$\forall \alpha$			
h	E_h	I_{hk}	
$h < h_e$	$S^3 \setminus \{S^1 \cup S^1\}$	ϕ	$c_1 < k$
		S^1	$k = c_1$
		$S^1 \times S^1$	$0 < k < c_1$
		$S^1 \times \square$	$k = 0$
		$S^1 \times S^1$	$a < k < 0$
		$S^1 \times \square$	$k \leq a$
$h = h_e$	Y (véase Fig. 2)	ϕ	$c_1 < k$
		S^1	$k = c_1$
		$S^1 \times S^1$	$0 < k < c_1$
		$S^1 \times \square$	$k = 0$
		$S^1 \times S^1$	$h_e < k < 0$
		S^1	$k = h_e$
		$S^1 \times S^1$	$a < k < h_e$
		$S^1 \times \square$	$k \leq a$
$h > h_e$	$\{S^3 \setminus S^1\} \cup \{S^3 \setminus S^1\}$	ϕ	$c_1 < k$
		S^1	$k = c_1$
		$S^1 \times S^1$	$0 < k < c_1$
		$S^1 \times \square$	$k = 0$
		$S^1 \times S^1$	$c_2 < k < 0$
		ϕ	$c_3 < k < c_2$
		S^1	$k = c_3$
		$S^1 \times S^1$	$a < k < c_2$
		$S^1 \times \square$	$k \leq a$

Para clasificar las trayectorias necesitamos un nuevo valor a . Este último valor es la raíz real positiva de la ecuación $h - \alpha p_\theta = 0$. Es fácil ver que, de a en adelante, todas las trayectorias dejan de estar acotadas. Cuando estamos en $p_\theta = k = 0$ las órbitas tampoco son acotadas. En el resto de los casos o no tenemos superficie de energía, o tenemos un punto o tenemos una trayectoria acotada.

Finalmente, S^{n-1} con $n > 1$, es la esfera de \square^n e Y es la unión de dos abiertos sólidos, identificándose punto a punto con dos círculos de cada toro que no pueden contraerse a un punto aislado del correspondiente toro (véase [5]).

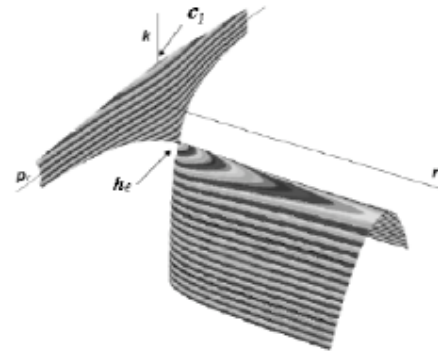


Fig. 2: $g^{-1}(h)$ para $h = h_e$ donde h_e es el punto de equilibrio y c_1 corresponde al valor de k para el extremo de la superficie de energía.

La clasificación topológica de E_h e I_{hk} se da en la Tabla 2. Para comprender esta topología se presenta la figura de la superficie de energía, véase Fig. 2.

5 Conclusiones

En este trabajo hemos considerado el problema de Kepler en un sistema de referencia rotante. Se ha descrito la dinámica hamiltoniana en las variedades invariantes E_h , J_k e I_{hk} y finalmente, se ha obtenido una completa clasificación topológica del espacio de fases asociado al sistema, la cual nos servirá para en posteriores trabajos calcular las variables acción-ángulo y dar una completa clasificación de las trayectorias periódicas y cuasiperiódicas.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido posible gracias al Departamento de Matemática Aplicada y Estadística de la UPCT.

Referencias

- [1] V. I. Arnold et al. "Systems III (Encyclopaedia of Mathematical Sciences)". Springer Verlag, Berlin. (1978).
- [2] D. Condurache and V. Martinusi, "Kepler's Problem in Rotating Reference Frames. Part1: Prime Integrals, Vectorial Regularization. Journal of Guidance, Control, and Dynamics", 30, 2007, 192-200.
- [3] D. Condurache and V. Martinusi, "Kepler's Problem in Rotating Reference Frames. Part2: Relative Orbital Motion. Journal of Guidance, Control, and Dynamics", 30, 2007, 201-213.
- [4] H. Goldstein. "Classical Mechanics". Addison-Wesley. (1980).
- [5] J. Llibre et al. "Phase portraits of the two-body problem with Manev potential". J. of Physics A: Mathematical and General 34, 919—1934. (2001)

Temas de interés para los miembros del proyecto: *Sobre algunos métodos numéricos y su relación con modelos matemáticos*

S. Amat, C. Bermúdez, S. Busquier, A. Guillamón, M. Moncayo y J.C. Trillo

Dpto. de Matemática Aplicada y Estadística de la U.P. Cartagena

Paseo Alfonso XIII, 48, 30203 Cartagena (Murcia)

E-mail: sergio.amat@upct.es

Resumen. En este artículo presentamos de forma resumida la investigación que está llevando a cabo los miembros que forman parte del proyecto "Sobre algunos métodos numéricos y su relación con modelos matemáticos".

1 Antecedentes

El Análisis Numérico es una rama de la Matemática Aplicada. De una forma más o menos precisa, se puede definir como la disciplina ocupada de describir, analizar y crear métodos numéricos que nos permitan resolver problemas modelizados con matemáticas. En el contexto del Análisis Numérico, a los métodos matemáticos se les suelen denominar **algoritmos**. Un algoritmo es un procedimiento que nos puede llevar a una solución aproximada de un problema mediante un número finito de pasos que pueden ejecutarse de manera lógica. El análisis numérico cobra especial importancia con la llegada de los ordenadores que son fundamentales para cálculos matemáticos.

Los temas usualmente tratados en el Análisis Numérico van desde la resolución de sistemas lineales y no lineales de ecuaciones a la aproximación de ecuaciones diferenciales pasando por la interpolación-aproximación de funciones y sus aplicaciones. Nuestra procedencia diversa tiene dos lecturas. En primer lugar no es fácil la colaboración de personas con distintas formaciones. En segundo lugar si esta colaboración llegase a existir podría ser mucho más fructífera en el sentido de la diversidad de problemas que podrían ser abordados. Este es nuestro mayor potencial. Nuestra intención pues ha sido formar un grupo lo suficientemente amplio para poder abordar los temas anteriormente mencionados. Somos conscientes de las limitaciones que en algunos de los temas tenemos. No obstante, como se puede observar en los trabajos de sus miembros, la unión de los mismos hace que el grupo cubra la mayoría de los tópicos del Análisis Numérico.

Por otra parte, los algoritmos que solemos proponer y estudiar están motivados en la mayoría de los casos por la Modelización Matemática. Un "**Modelo matemático**" es una traducción de la realidad física para poder aplicar los instrumentos y técnicas de las teorías matemáticas con el fin de estudiar el comportamiento de sistemas complejos, y posteriormente hacer el camino inverso para traducir

los resultados numéricos a la realidad física. Generalmente se introducen simplificaciones de la realidad, ya que, un estudio directo daría lugar a modelos demasiado complicados que no se podrían resolver con las técnicas y conocimientos actuales. En este sentido, no sólo nos preocupamos de modelos propios sino que intentamos colaborar con otros grupos de investigación más aplicada.

2 Líneas de Investigación

En esta sección se presentan las distintas líneas de investigación que desarrolla el grupo.

2.1 Métodos iterativos para ecuaciones no lineales

En Matemática Aplicada, uno de los problemas más habituales al que nos enfrentamos es la aproximación de ecuaciones. Una expresión como $F(x)=0$ puede modelizar diferentes problemas, resolución de un sistema de ecuaciones, encontrar la solución de una ecuación diferencial o hallar las raíces de un polinomio. La obtención de la solución no es posible en general. Este hecho motiva el estudio de métodos numéricos y en particular los iterativos.

Los métodos iterativos, parten de una o más aproximaciones a la raíz y crean una sucesión que bajo ciertas condiciones converge a la raíz deseada. El método más conocido es sin duda, el de Newton que tiene convergencia cuadrática (orden dos) para raíces simples.

El adelanto de los medios técnicos ha permitido el desarrollo de gran variedad de métodos iterativos para resolver ecuaciones no lineales en espacios de Banach. Por ejemplo, la simplicidad para evaluar inversas y segundas derivadas de Fréchet, en algunos casos, ha aumentado el uso de métodos de tercer orden, como, los de Halley y Chebyshev.

Al estudiar un método iterativo, uno de los aspectos más importante a considerar es la convergencia (orden del mismo). Para dicho análisis, en ocasiones, es suficiente conocer un intervalo que contenga a la raíz, más ciertas hipótesis de regularidad, este tipo de convergencia se conoce como convergencia global. Otros resultados ("tipo Kantarovich"), establecen condiciones suficientes en el operador y en la primera aproximación a la solución (pivote) para asegurar que la sucesión generada por el esquema converja a una solución de la ecuación, dando lugar a los llamados teoremas semilocales de convergencia. Por último, en los llamados teoremas locales de convergencia, se imponen las hipótesis sobre la raíz buscada. Además todo este tipo de teoremas proporcionan estimaciones del error. Por otra parte, la implementación y eficiencia de los distintos esquemas son aspectos imprescindibles a estudiar.

En esta temática se desea proponer diversos métodos (modificaciones o variantes de Steffensen, Halley, etc), estudiando su convergencia (donde se generalizan teoremas para los métodos clásicos), su implementación y comparando su eficiencia con los métodos ya existentes (donde se verán sus mejoras).

2.2 Técnicas de aproximación no lineales y aplicaciones

El análisis de Fourier proporciona una manera de representar funciones de cuadrado integrable en términos de sus componentes sinusoidales. La descomposición de Fourier es una herramienta básica para una gran variedad de aplicaciones en muchos campos de la Ciencia. Sin embargo, tiene algún inconveniente, aquí destacaremos su carácter global. En Fourier, una singularidad aislada domina la conducta de todos los coeficientes de la descomposición y nos impide conseguir información precisa sobre la función lejos de la singularidad.

Descomposiciones locales como las provenientes de las ondículas y sus variantes no lineales proporcionan una mejor representación. Típicamente, uno comienza con una sucesión finita, que es, de algún modo, asociada a la información discreta de una señal dada al nivel más fino de la resolución considerada. Procesando la señal en diferentes niveles de resolución, se puede escribir esta información discreta de una nueva manera. La nueva sucesión tiene el mismo cardinal que la primera (si se usa un esquema no redundante) y sus coeficientes representan por un lado los detalles a cada nivel de la resolución y por otro una aproximación "grosera" final a la señal original.

Uno de los aspectos fundamentales de esta parte es profundizar en la Multirresolución no lineal introducida por Harten. Esta multirresolución puede verse como una generalización de la teoría wavelet, permitiéndonos trabajar en muy diversas situaciones

y poder abordar gran cantidad de problemas. Además, esta multirresolución permite utilizar representaciones no lineales (datos-dependiente), lo que nos permitirá dar algoritmos más adaptados a los problemas a tratar. Esto es debido a que el operador de predicción utilizado en la teoría de Harten puede no ser lineal.

En los últimos años parte del grupo ha desarrollado varios operadores de predicción no lineales. Además se han propuesto teorías matemáticas que permiten estudiar la convergencia y estabilidad de los algoritmos.

En este sentido nos gustaría seguir avanzando. En particular, nos gustaría obtener predicciones de mayor orden, realizar su estudio teórico y ampliar el abanico de aplicaciones. En este sentido nos gustaría no sólo abordar problemas relacionados con el tratamiento de señales (como compresión, eliminación de ruido, zoom, etc.) sino otras como la obtención de fórmulas de cuadratura y de diferenciación numérica adaptadas a la presencia de singularidades en la señal. Además, nos gustaría comenzar con la inserción de técnicas estadísticas para la obtención de los operadores de predicción. La naturaleza de las imágenes, con textura, hace intuir que estas técnicas pueden mejorar las aproximaciones construidas con procedimientos no estadísticos. Por último nos gustaría destacar que estamos realizando estudios de imágenes de origen biológico relacionados con la monitorización de procesos de anestesia en quirófano y con la búsqueda de concentraciones y patrones.

2.2 Aproximación numérica de ecuaciones

Las ecuaciones diferenciales aparecen naturalmente al modelizar situaciones físicas en las ciencias naturales, ingeniería, y otras disciplinas, donde hay envueltas razones de cambio de una ó varias funciones desconocidas con respecto a una ó varias variables independientes. Estos modelos varían entre los más sencillos que envuelven una sola ecuación diferencial para una función desconocida, hasta otros más complejos que envuelven sistemas de ecuaciones diferenciales acopladas para varias funciones desconocidas. Por ejemplo, la ley de enfriamiento de Newton y las leyes mecánicas que rigen el movimiento de los cuerpos, al ponerse en términos matemáticos dan lugar a ecuaciones diferenciales. Usualmente estas ecuaciones están acompañadas de una condición adicional que especifica el estado del sistema en un tiempo o posición inicial. Esto se conoce como la *condición inicial* y junto con la ecuación diferencial forman lo que se conoce como el *problema de valor inicial*. Por lo general, la solución exacta de un problema de valor inicial es imposible ó difícil de obtener en forma analítica. Por tal razón los métodos numéricos se utilizan para aproximar dichas soluciones.

Las ecuaciones diferenciales ordinarias vinculan las derivadas de funciones de una variable. Los métodos estudiados para EDOs no son en general aplicables a las ecuaciones en derivadas parciales (EDP). La solución numérica de las EDP es toda una disciplina; los problemas en mecánica de fluidos, transmisión de calor, cálculo de tensiones y deformaciones en sólidos, etc. son expresados en términos de una EDP. Las grandes exigencias planteadas al hardware en la resolución de EDPs ha provocado que los métodos y algoritmos traten de explotar al máximo las particularidades del problema. Por ello, existen textos completos sobre técnicas particulares, trucos, etc. muy vinculadas al problema específico. Esta situación, que podría interpretarse como negativa, muestra el interés y la vigencia de las investigaciones sobre el tema.

Para este tema, el grupo está interesado tanto en la aproximación de EDOs como de EDPs. Para el primer apartado, recientemente hemos propuesto una nueva vía para la obtención de nuevos métodos numéricos. Se trata de una técnica variacional con la que se han obtenido resultados muy alentadores y que nos animan a seguir en esta línea. Las posibilidades a explorar son lo suficientemente amplias como para no poder ser concluidas en un solo proyecto. Se trata de una nueva forma de ver la ecuación que abre muchas vías de exploración. Para las EDPs nos gustaría seguir avanzando en problemas de dinámica de fluidos que son donde el grupo tiene su mayor experiencia. Ecuaciones tipo leyes de conservación, Hamilton-Jacobi, de aguas poco profundas.

3 Conclusiones

En este trabajo hemos expuesto de forma resumida las líneas de investigación en las que trabajamos. Las distintas líneas, en un principio independientes, pueden de forma natural interaccionar. Cabría destacar que los métodos multiescala permiten obtener algoritmos adaptativos para las EDPs. En este sentido nos gustaría obtener multirresoluciones no lineales tipo Hermite y analizar su aplicación como herramientas de discretización de las ecuaciones. También, pueden usarse los algoritmos de multirresolución en la implementación de los métodos iterativos para ecuaciones no lineales. El grupo ya tiene experiencia en este tema. Por su parte, los métodos iterativos permiten resolver ecuaciones provenientes de las discretizaciones de las EDOs y EDPs. Por ejemplo, para la obtención de los mínimos de la propuesta variacional para EDOs que comentamos en el punto anterior o para la resolución de las ecuaciones derivadas por los métodos implícitos en la aproximación de problemas rígidos. Por último, mediante técnicas variacionales se pueden modelizar problemas relacionados con el tratamiento de señales.

Las aplicaciones se realizan fundamentalmente en colaboración con otros grupos de investigación más aplicada (y serán comentadas en el punto de colaboraciones). No obstante, en nuestros artículos de investigación siempre se suelen añadir ejemplos de interés aplicado donde testamos los algoritmos numéricos.

Agradecimientos

El trabajo del grupo está subvencionado por los proyectos 08662/PI/08 y MTM2007-62945.

Referencias

- [1] Amat, S.; Busquier, S. Third-order iterative methods under Kantorovich conditions. *J. Math. Anal. Appl.* 336 (2007), no. 1, 243--261.
- [2] Amat, S.; Donat, R.; Liandrat, J.; Trillo, J.C. Analysis of a new nonlinear subdivision scheme. Applications in image processing. *Found. Comput. Math.* 6 (2006), no. 2, 193--225.
- [3] Amat, S.; Moncayo, M. Exact error bounds for the reconstruction processes using interpolating wavelets. *Math. Comput. Simulation.*, aparecerá en 2009.
- [4] Amat, S.; Pedregal P. A variational approach to implicit ODEs and differential inclusions. *ESAIM: Control, Optimisation and Calculus of Variations*, 15 (2009), no 1, 139-148.